

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra částí a mechanismů strojů

**Návrh hobby laserového gravírovacího
stroje**

**Design of a hobby laser engraving
machine**

Student:

Bc. Patrik Vítek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Květoslav Kaláb, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra částí a mechanismů strojů

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Patrik Vitek

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace:

40 Konstrukce strojních dílů a skupin

Téma:

Návrh hobby laserového gravírovacího stroje
Design of a Hobby Laser Engraving Machine

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhnete laserový gravírovací stroj s výkonem laserové diody do 6W pro domácí hobby použití. Minimální rozměry pracovní plochy jsou 600 x 400 mm. Zařízení navrhujte s ohledem na minimalizaci nákladů na stavbu a provoz stroje. Pohon řešte pomocí krokových motorů. Vypracujte 3D model stroje a další dokumentaci podle pokynů vedoucího práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

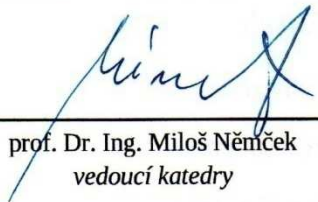
- BOLEK, A., KOCHMAN, J. a kol. *Části strojů I,II*. Praha: SNTL, 1989. 776s. ISBN 80-03-0046-7.
MORAVEC, V., HAVLÍK, J. *Výpočty a konstrukce strojních dílů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. 72 s. ISBN 978-80-248-0878-9.
NĚMČEK, M. *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů*. 2. vydání. Skripta. Ostrava: VŠB-TUO. 2008, ISBN 978-80-248-1782-8.
NĚMEC, J., DVOŘÁK, J., HÖSCHL, C. *Pružnost a pevnost ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1989. 599s. ISBN 80-03-00193-5.
ROBERT C. JUVINALL, KURT M. MARSHEK. *Fundamentals of machine component design*. Second Edition. 1991. John Wiley & Sons.
SHIGLEY, J., E., MISCHKE CH., R., BUDYNAS R., G. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. 1186 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

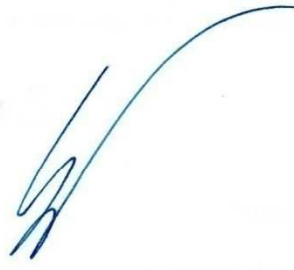
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Květoslav Kaláb, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


prof. Dr. Ing. Miloš Němček
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. 5. 2018

.....


Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21.5.2018



.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Patrik Vítek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nádražní 406, 747 27 Kobařice

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří mému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Květoslavu Kalábovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc v celém průběhu zpracování.

V Ostravě 21. května 2018



.....

podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VÍTEK, P. *Návrh hobby laserového gravírovacího stroje: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2018, 48s., Vedoucí práce: Kaláb K.

Diplomová práce se zabývá návrhem hobby laserového gravírovacího stroje s laserovou diodou do 6 W. Začátek práce je věnován přehledu technologií a následně jednotlivým typům laserového gravírování. Další částí je vlastní návrh konstrukce zařízení. Poté následují konstrukční výpočty průhybů profilů, zatěžujících sil na zařízení a další kontrola použitých součástí. Práce pokračuje nastavením přesnosti chodu a experimentální kontrolou chlazení laserové diody. Následující část se zabývá potřebným softwarem pro řízení a provoz zařízení. V závěru je zobrazen vyrobený gravírovací stroj. Výsledkem diplomové práce je konstrukční návrh laserového zařízení pro gravírování a řezání vybraných materiálů včetně vybrané výkresové dokumentace.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VÍTEK, P. *Design of a Hobby Laser Engraving Machine: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine Parts and Mechanisms, 2018, 48p., Thesis head: Kaláb K.

The master thesis deals with suggestion of hobby laser engraving machine with a laser diod up to 6W. The beginning of this work is dedicated to overview of technologies and then to particular types of laser engraving. The next part is suggestion of the device construction. Then is it followed by constructional computations of profile cambers, charging powers on the device and another check of the used components. The thesis then continues with setting of the run accuracy and experimental check of cooling of the laser diod. Following part deals with needed software for operating and work of the device. In the conclusion, there is delineation of the made engraving device. The result of this master thesis is constructional suggestion of laser device for engraving and cutting of selected materials including selected drawing documentation.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	9
Úvod.....	11
1. Přehled technologií gravírování.....	12
1.1 Gravírování CNC frézou	12
1.2 Gravírování proudem abraziva	13
1.3 Gravírování vodním paprskem	13
1.4 Gravírování laserem	13
2. Laserové gravírování	14
2.1 Gravírovací zařízení s CO ₂ lasery	15
2.2 Gravírovací zařízení s Nd-YAG lasery	16
2.3 Gravírovací zařízení s vláknovými lasery	16
2.4 Gravírovací zařízení s polovodičovými lasery	17
3. Popis konstrukčního řešení	18
4. Konstrukční výpočty.....	22
4.1 Výpočet průhybu profilů	22
4.1.1 Průhyb profilu osy X.....	23
4.1.2 Průhyb profilu osy Y	24
4.2 Kontrola použitých motorů.....	25
4.3 Zatížení a kontrola os kol	27
4.4 Kontrola trvanlivosti ložisek kol	33
5. Pohonné zařízení.....	34
5.1 Shield	35
5.2 Drivery A4988	36
6. Laserový modul	38
6.1 Laserová dioda.....	38
6.2 Housing.....	39
7. Software	41
8. Vyrobené gravírovací zařízení.....	43
9. Závěr	45
10. Literatura.....	46
11. Přílohy.....	48

Seznam použitých značek a symbolů

a_p	zrychlení pohonu	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}]$
d	minimální průměr osy	$[\text{mm}]$
d_k	průměr kolečka	$[\text{mm}]$
$d_{\dot{r}}$	průměr řemenice	$[\text{mm}]$
g	tíhové zrychlení	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
k_s	bezpečnost	$[-]$
i	převodový poměr	$[-]$
k_{Dov}	minimální dovolená bezpečnost	$[-]$
l	délka	$[\text{mm}]$
m_p	hmotnost 1m profilu	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}]$
m_x	hmotnost komponent na ose X	$[\text{kg}]$
m_y	hmotnost komponent na ose Y	$[\text{kg}]$
n_k	otáčky kolečka	$[\text{min}^{-1}]$
n_M	otáčky motoru	$[\text{min}^{-1}]$
n_{1ot}	počet kroků za jednu otáčku	$[\text{krok}]$
o	obvod kolečka	$[\text{mm}]$
p	exponent rovnice pro ložiska	$[-]$
q_x	zatížení vlastní tíhy profilu X	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$
q_y	zatížení vlastní tíhy profilu Y	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$
v_p	rychlost pohonu	$[\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}]$
w_{Dov}	dovolený průhyb	$[\text{mm}]$
w_x	celkový průhyb osy X	$[\text{mm}]$
w_{xq}	průhyb profilu X od vlastní tíhy	$[\text{mm}]$
w_{xF}	průhyb profilu X od nesených komponentů	$[\text{mm}]$
w_y	celkový průhyb osy Y	$[\text{mm}]$
w_{yq}	průhyb profilu Y od vlastní tíhy	$[\text{mm}]$
w_{yF}	průhyb profilu Y od nesených komponentů	$[\text{mm}]$
C	základní dynamická únosnost	$[\text{N}]$
E	modul pružnosti v tahu	$[\text{MPa}]$
F	síla	$[\text{N}]$
F_C	celková síla	$[\text{N}]$
F_o	celková obvodová síla	$[\text{N}]$

$F_{O'}$	obvodová síla	[N]
F_O	celková obvodová síla	[N]
$F_{PŘ}$	předepínací síla	[N]
F_r	rozběhová síla	[N]
F_V	výsledná síla	[N]
F_x	zatížení od nesených součástí na ose X	[N]
F_y	zatížení od nesených součástí na ose Y	[N]
I	kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
I_{max}	maximální jmenovitý proud motoru	[A]
L_x	výpočtová délka profilu X	[mm]
L_y	výpočtová délka profilu Y	[mm]
L_{xy}	skutečná délka za otáčku	[mm]
L_{10}	základní trvanlivost ložiska	[mil.ot]
L_{10h}	trvanlivost ložiska v provozních hodinách	[hod]
M_k	točivý moment	[Nm]
M_{kM}	točivý moment motoru	[Nm]
M_O	ohybový moment	[Nm]
P	ekvivalentní zatížení	[N]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_s	odpor	[Ω]
V_{Ref}	referenční napětí	[mV]
W_O	modul průřezu v ohybu	[mm ³]
W_x	modul průřezu v ohybu osy X	[mm ³]
W_y	modul průřezu v ohybu osy Y	[mm ³]
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$	pomocné úhly	[°]
α_{Mo}	součinitel koncentrace napětí	[-]
η	koeficient bezpečnosti	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
σ_{Dov}	dovolené napětí	[MPa]
σ_o	ohybové napětí	[MPa]

Úvod

Téma diplomové práce návrh hobby laserového gravírovacího stroje jsem si vybral, protože již třetím rokem se intenzivně zabývám laserovým vypalováním na organické materiály zejména dřevo. Před dvěma lety jsem si doma postavil první laserové gravírovací zařízení s dřevěným rámem a principu pohonu coreXY. Z důvodu potřeby větší pracovní plochy, alespoň 600 x 400 mm a větší spolehlivější konstrukce, jsem se rozhodl pro druhou verzi gravírovacího zařízení. Touto verzí se zabývá daná diplomová práce s přiloženou výkresovou dokumentací.

Práci jsem se snažil psát tak, aby zručný kutil si dovedl v domácích podmínkách postavit obdobné zařízení za minimální náklady. Vlastní konstrukce je stavěna v průběhu psaní této práce. Tato konstrukce je tvořena hliníkovými profily. Pojezdy zajišťují celkem tři krokové motory s ozubenými řemeny. Obráběcím zařízením je polovodičová laserová dioda o výkonu 6W dle požadavků zadání. Některé mé díly jsou navrženy pro výrobu pomocí 3D tiskárny z materiálu PETG. Další jsou vyřezány z hliníkových slitin či vlastnoručně vysoustruženy. Celá konstrukce je ovládaná pomocí platformy arduino Uno patřící k jednoduchým základním programovacím deskám.

1. Přehled technologií gravírování

Gravírování je technologie umožňující nesmazatelně popisovat a označovat různé podklady pomocí odebrání materiálu. První rytiny do dřeva, kostí či kamene jsou známy již z pravěku. Rytí patří ke starodávným řemeslům používajícím se dodnes. Tato technologie nachází v současné době uplatnění především tam, kde je potřeba zajistit dlouhodobou životnost označení výrobků. Gravírovací stroje se uplatňují ve všech firmách a oborech používající signmakingové pracoviště.

1.1 Gravírování CNC frézou

Stroj řízený počítačem konstruovaný pro třískové obrábění materiálu. Nástrojem pro obrábění jsou rotační a nerotační gravírovací hroty vyráběné ze slinutých karbidů nebo diamantu. Rotační hroty se používají na tvrdé nebo křehké povrchy jako jsou například mramor, sklo a keramika. Nerotační hroty se využívají pro jemné rytí měkkých materiálů. Výhodou stroje je jednoduchý a levný provoz.

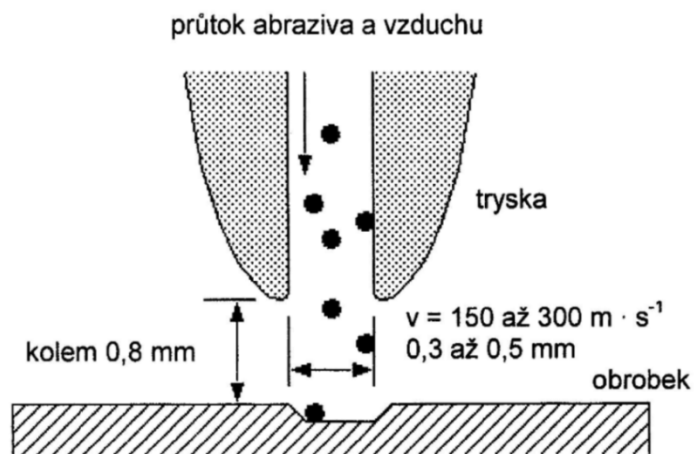
Na obr.1.1 je CNC fréza s vysokofrekvenčním vřetenem vhodným pro gravírování a frézování dřeva, plastů apod. Malá konstrukce stroje je vhodná pro modeláře.



Obr. 1.1 – CNC gravírovací fréza Kompas H 1000 HF [7]

1.2 Gravírování proudem abraziva

Metoda oddělování materiálu využívající kinetickou energii abrazivních částic. Přenosovým médiem je nejčastěji vzduch, oxid uhličitý nebo dusík. Abrazivním materiálem se běžně používá korundový písek nebo oxid hlinitý. Výhodou dané technologie je tepelně neovlivněný materiál a levný provoz.



Obr. 1.2 – Princip abrazivního obrábění [6]

1.3 Gravírování vodním paprskem

Odebírání (tzv. microchipping) částic materiálu následkem dopadu velkou kinetickou energií a vysokou rychlostí úzkého proudu vody na obrobek. Paprskem vody lze gravírovat i řezat. Metoda vhodná pro většinu dostupných materiálů nedestruktivním vlivem vlhkostí prostředí. Technologie s bezprašným provozem a možností obrábění tepelně citlivých materiálů. Pro zvýšení účinnosti se může přidat do proudu vody vhodné abrazivum.



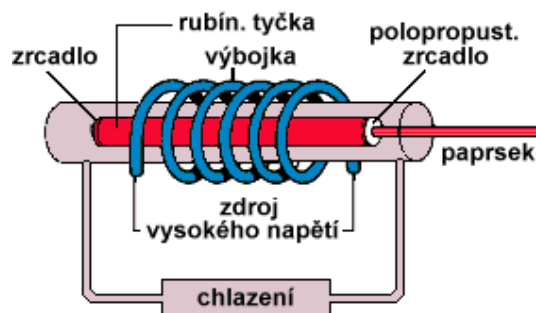
Obr. 1.3 – Gravírování vodním paprskem [26]

1.4 Gravírování laserem

Je to specifická technologie využívající laserového paprsku. Při gravírování dochází k odpařování vrstvy materiálu v podobě kouře, který odvádí teplo a tím minimalizuje teplotní namáhání gravírovaného povrchu. Laser nevyvíjí žádný tlak během zpracování, proto není nutné jakékoliv upnutí nebo fixace obrobku. Touto technologií gravírování se zabývá následující část diplomové práce.

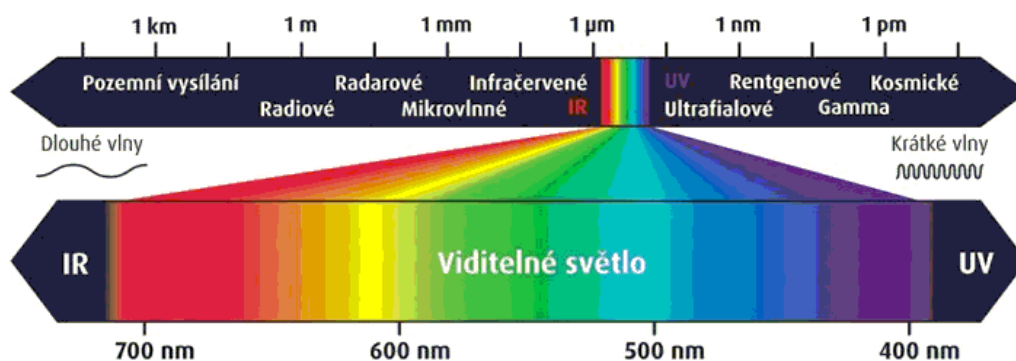
2. Laserové gravírování

Fyzikální princip laseru (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) popsal již v roce 1917 Albert Einstein. První funkční laser předvedl v roce 1960 v USA Theodore H. Main, který použil jako aktivní prostředí krystal rubínu. Je to optický zdroj elektromagnetického záření pracující na principu zesilování světla stimulovanou emisí záření aktivních částic. Paprsek je koherentní a monochromatický oproti světlu přirozených zdrojů, má tedy stejnou vlnovou délku, frekvenci a fázi. Všechny lasery pracují na stejném základě s velmi se lišící konstrukcí a vlastnostmi.



Obr. 2.1 – Princip rubínového laseru [6]

Lasery mají široké uplatnění zejména v průmyslu, medicíně, spotřební elektronice, vojenství a také výzkumu. Obráběním se odebírá pouze malé množství materiálu. Předností technologie je bezkontaktní metoda, detailní zpracování a hladký řez bez nutnosti dalšího opracování. Ke gravírovacím účelům se nejčastěji používají plynové infračervené CO₂ lasery, pevnolátkové Nd-YAG, vláknové (fiber) a polovodičové lasery. Jednotlivé typy pracují s rozdílným elektromagnetickým vlněním a výkonem vhodným vždy pro jiný druh materiálu.



Obr. 2.2 – Elektromagnetické spektrum [19]

2.1 Gravírovací zařízení s CO₂ lasery

Nejvýkonnější a nepoužívanější z plynových laserů je laser s oxidem uhličitým. Zařízení generuje infračervené záření na hladině 10,6 μm vlnové délky. Buzení zajišťuje elektrický výboj vysokonapětového zdroje (1000 ÷ 1700 V při proudu 30 až 50 mA) směsi plynu v trubici. Aktivní prostředí plynu má životnost okolo 10 000 h provozu, poté je potřeba ji vyměnit. Konstrukce vhodná zejména pro materiály organického původu typu dřevo, kůže, papír a sklo. Laser s danou vlnovou délkou nedokáže příliš interagovat s kovovými materiály.



Obr. 2.3 – Laserová CO₂ trubice [8]

Na obr. 2.5 je nejběžnější vizualizace CO₂ gravírovacího zařízení na trhu. Svým výkonem od 10 ÷ 150 W zvládne řezat a gravírovat materiály až do hloubky 20 mm. Konstrukce s minimálními požadavky na údržbu, kompaktností a ekonomicky nejvýhodnější typ laseru pro hobby modeláře a malé výrobní linky.



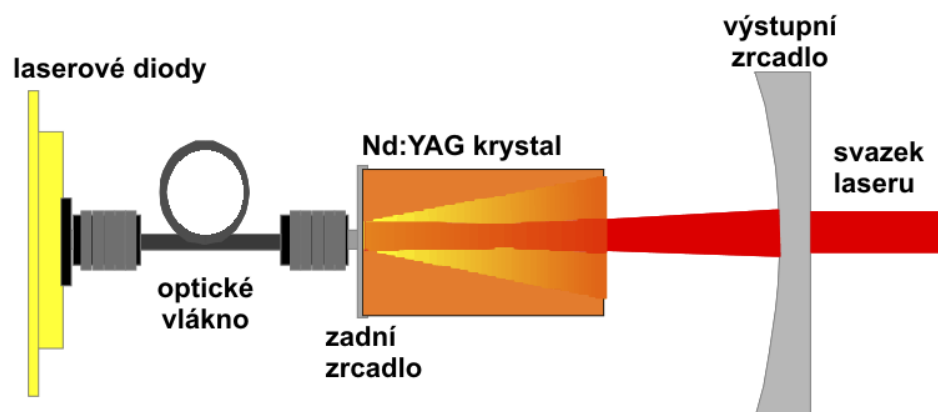
Obr. 2.4 – Výrobek CO₂ laseru [18]



Obr. 2.5 – Gravírovací zařízení CO₂ [13]

2.2 Gravírovací zařízení s Nd-YAG lasery

V současnosti nepoužívanější pevnolátkový laser. Aktivním materiálem je krystal Yttrium Aluminium Granátu ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) s vlnovou délkou záření 1064,1 nm. Maximální výkon daného typu laseru dosahuje několika stovek wattů. Vyniká spolehlivostí, jednoduchostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady. Hojně se využívá pro řezání, značkování, vrtání a svařování ocelí, mědi, hliníku i plastů.



Obr. 2.6 – Princip Nd-YAG laseru [15]

2.3 Gravírovací zařízení s vláknovými lasery

Pokroková technologie nejmodernějších laserů pro řezání, značení a gravírování. Aktivním prostředím je ytterbiové optické vlákno s vlnovou délkou záření 1064 nm. Výkony se pohybují až v desítkách kilowattů. Předností je excelentní kvalita laserového paprsku, nejnižší provozní náklady a více než desetinásobně delší životnost laseru oproti ostatním typům. Materiály k obrábění jsou shodné jako u Nd-YAG z důvodu stejné vlnové délky.



Obr. 2.7 – Vláknový laser Lintech [17]



Obr. 2.8 – Značení laserem [16]

2.4 Gravírovací zařízení s polovodičovými lasery

Polovodičové laserové diody jsou nejrozšířenější lasery, které se používají. Pracují v rozmezí záření $400 \div 850$ nm vlnové délky. Vynikají jednoduchou, velmi malou a levnou konstrukcí. Gravírovací zařízení využívající laserové diody mívají optický výkon až 15 W, který zvládne popisovat a gravírovat dřevo, plast a řezat papír či tenké dýhy. Tento typ laseru bude použit v řešení zadané diplomové práce.

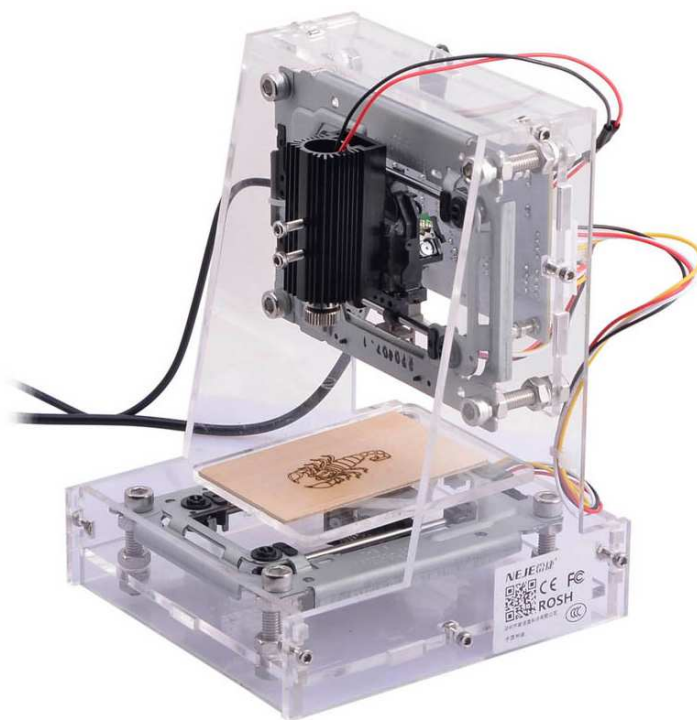


Obr. 2.9 – Laserová dioda [25]



Obr. 2.10 – Hotový výrobek [22]

Gravírovací zařízení využívající daný typ laseru vyniká svou jednoduchostí řízení, nízkou cenou a malou velikostí samotného laserového modulu. Na obr. 2.11 je zobrazena konstrukce vhodná pro domácí použití a hobby modeláře.

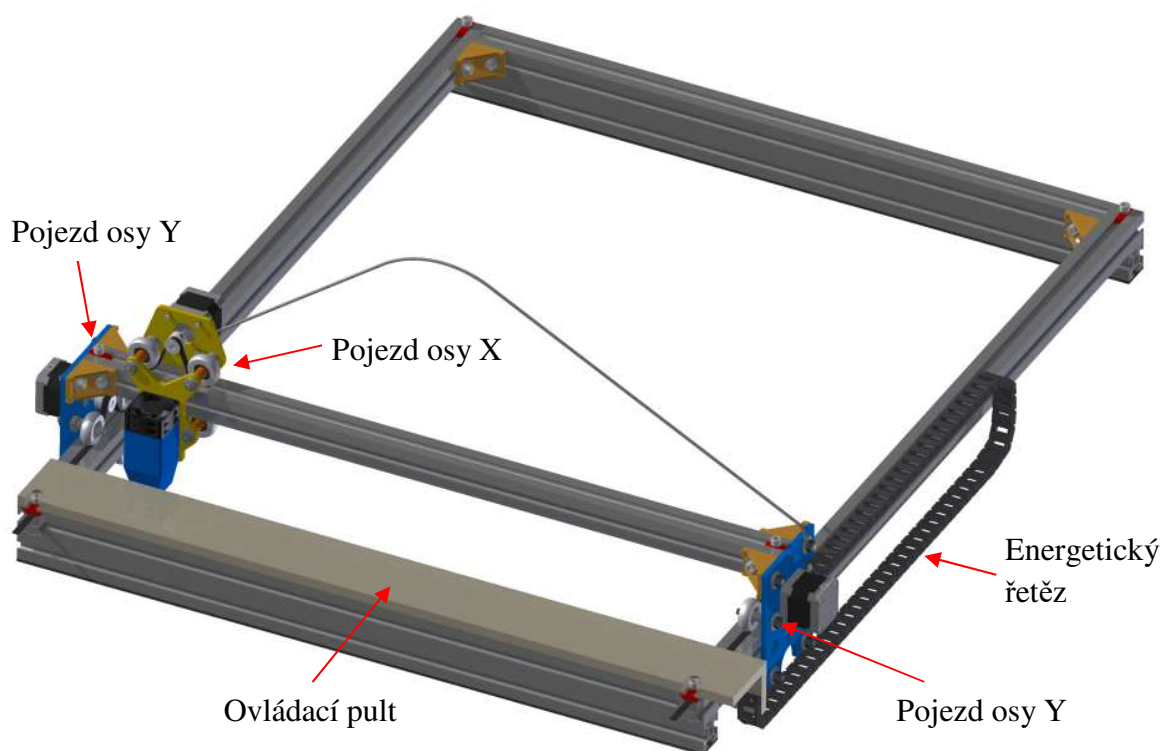


Obr. 2.11 – Gravírovací stroj s laserovou diodou [5]

3. Popis konstrukčního řešení

Gravírovací zařízení je znázorněno na obr. 3.1. Rám je sešroubovaný z hliníkových profilů a úhelníků, které nařezala a dodala firma e-Hlinik [11]. Pohonnou částí jsou krokové motory s ozubenými řemeny. Ty jsou ručně napínány a zajištěny šroubem M6. Pojezd zajišťují kolečka s ložisky odvalující se v profilové drážce hliníkových profilů. Rám je opatřen antivibrační páskou pro omezení přenosu vibrací ze zařízení do podlahy. K pojezd na ose X je připevněn laserový modul popsáný v kap. 6. Kabely zařízení jsou uloženy v pohyblivém energetickém řetězu připevněném k pojezdu Y a desce pultu, na kterém jsou uloženy veškeré ovládací prvky stroje.

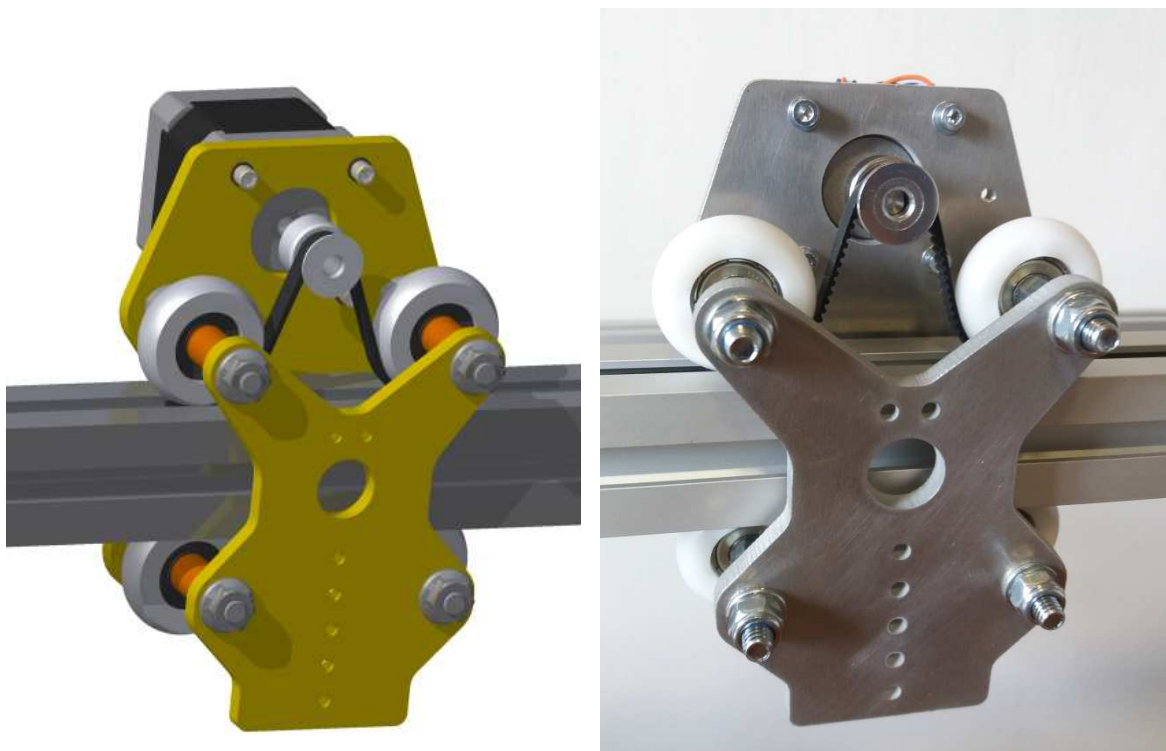
Hlavní části zařízení jsou popsány v následujících kapitolách. Během provozu je nutné mít zajištěno odvětrávání místnosti a obsluhu s brýlemi pro práci s laserem.



Obr. 3.1 – Vlastní konstrukční řešení

Řešení pojezdu

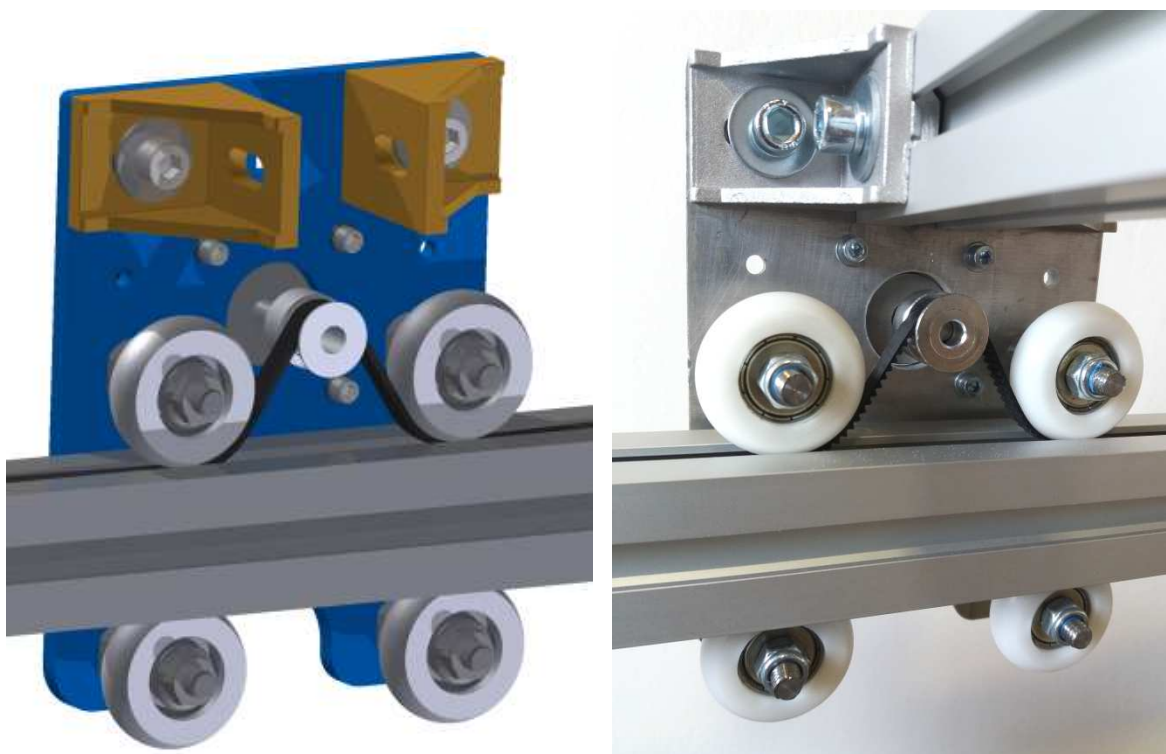
Pojezdy os X i Y pracují na stejném principu. Kolečka s profilovým zaoblením pro drážku použitého profilu zajišťují plynulý chod a přesné vedení. Jednotlivé kolečka jsou přišroubována na vlastní osu. Všechny osy jsou připevněny k desce z hliníkové slitiny AlMgSi dle ČSN 424401 spojující pojezd v jeden celek. Pohon zajišťují krokové motory s točivým momentem $M_k = 0,52 \text{ Nm}$ osazené ozubenými řemenicemi se středním průměrem $d_f = 12,7 \text{ mm}$. Pohon je více popsán v následujících kapitolách. Ozubený řemen je pevně přichycen na konci profilu a je provlečen pod prvním kolečkem. Z něj vede přes ozubenou řemenici ke druhému podvlečenému kolečku. Od něj je řemen veden až na druhý konec profilu, kde je opět pevně uložen. Na zařízení jsou použity řemeny GT2, které se hlavně využívají při stavbách 3D tiskáren.



Obr. 3.2 – Pojezd osy X

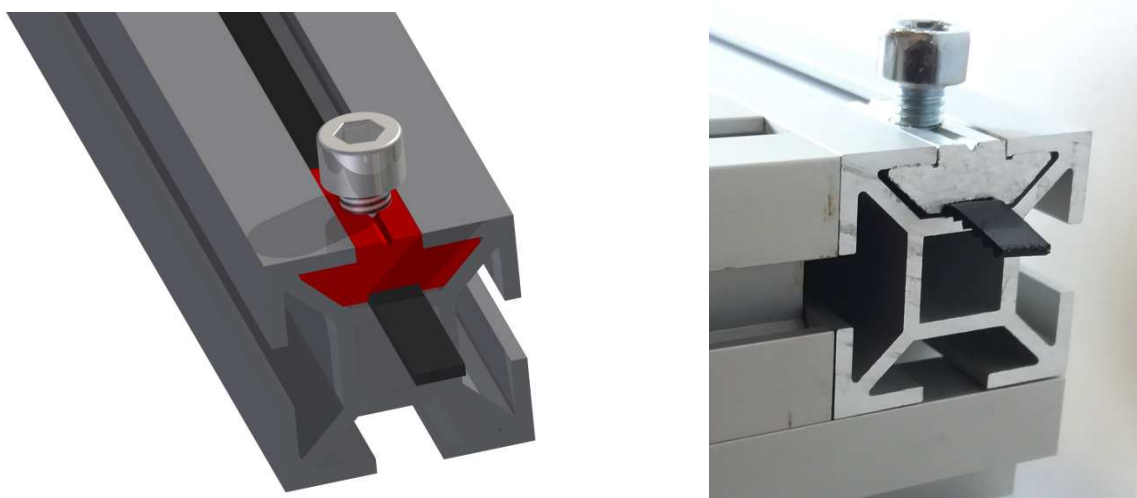
Na obr. 3.2 je znázorněn pojezd na ose X. Každý pojezd je tvořen čtyřmi kolečky a jedním krokovým motorem. Tvar duralových desek je navrhnout s ohledem na minimalizaci hmotnosti a rozměru. Tyto desky pro pojezdy X i Y mají spodní díry pro osy oválné, aby šly vymezit vůle mezi kolečky. V přední části desky jsou vyvrtány otvory pro uchycení a popřípadě polohování laserového modulu.

Následující obrázky zachycují konstrukci pojezdu osy Y. Konstrukce gravírovacího zařízení má dva samostatné pojezdy osy Y spojené profilem osy X. Největší zatížení působí na horní osy koleček. V následující kapitole je popsána jejich kontrola.



Obr. 3.3 – Pojezd osy Y

Napínání řemenu je konstruováno s ohledem na rychlost, přesnost a jednoduchost. Napínák je vyroben z profilu na matice ke spojování profilů. Ve spodní části napínáku je vybroušená drážka s přesným rozměrem řemenu. Ta slouží k přesnému vymezení směru řemenu při dotahování šroubu M6 při jeho zajištění.



Obr. 3.4 – Napínák řemenu

Vedení kabelů

Veškerá kabeláž pohonů a laserového modulu musí být uložena pohyblivě. Kabely nesmí přijít ke styku s kolečky nebo jakkoliv zadržávat. To by mohlo vést k nepravidelnosti chodu pohonu a tím viditelným defektům na gravírovaném povrchu.

Vedení mezi pojezdem osy X a Y je konstruováno pomocí kabelové spirály. Při použití těchto spirál je zapotřebí podpory. Pro tu jsem použil kabel CYKY 1,5 mm přišroubovaný k oběma pojezdům. Podél tohoto kabelu je vedeno veškeré potřebné vedení. Spirála je obtočena kolem kabelů přes celou délku a udržuje všechno vedení pohromadě při zachování pohyblivosti. Pro danou konstrukci jsem použil spirálu s průměrem 6 mm a délkou 80 cm.



Obr. 3.5 – Kabelová svazovací spirála

Kabeláž z pojezdu Y k ovládacímu pultu je vedena pomocí přišroubovaného článkového energetického řetězu. Ten ji vede a chrání po celé délce. Pro danou konstrukci jsem použil článkový řetěz s vnitřním průřezem 20 x 10 mm od firmy [12] a délku 1m.



Obr. 3.6 – Článkový energetický řetěz

4. Konstrukční výpočty

Kapitola zabývající se návrhem a kontrolou částí zařízení. Úvodní část se zabývá průhybem profilů. Následuje rozklad sil působících na pojezdy a jejich kontrola.

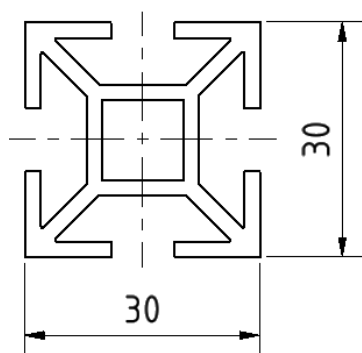
4.1 Výpočet průhybu profilů

Rám zařízení je zatěžován vlastní tíhou profilu a tíhou všech částí na něm uloženém. Následující podkapitola se zabývá průhybem profilu na ose X a ose Y. Průhyb je nutný znát pro vyloučení ovlivnění samotného gravírování. Při vysokém průhybu konstrukce by mohlo dojít k rozostření laseru a tím ke znehodnocení práce. Dle mých zkušeností s laserovým gravírováním volím maximální dovolený průhyb profilu $w_{Dov} = 1 \text{ mm}$. Daná hodnota je rozdíl od zaostření laseru na obrobek, která nezmění optický výkon laseru a tím vizuální vzhled hotové práce. V tab. 4.1 jsou zapsány potřebné parametry pro výpočet průhybu.

Tab. 4.1 – Technické parametry hliníkových profilů [11]

Typ	Kvadratický moment průřezu I (mm ⁴)	Průřezový modul $W_{x,y}$ (mm ³)	Modul pružnosti v tahu E (GPa)	Hmotnost 1m profilu m_p (kg/m)
Al profil Kombi elox 30 x 30	32 400	1 800	71	0,8

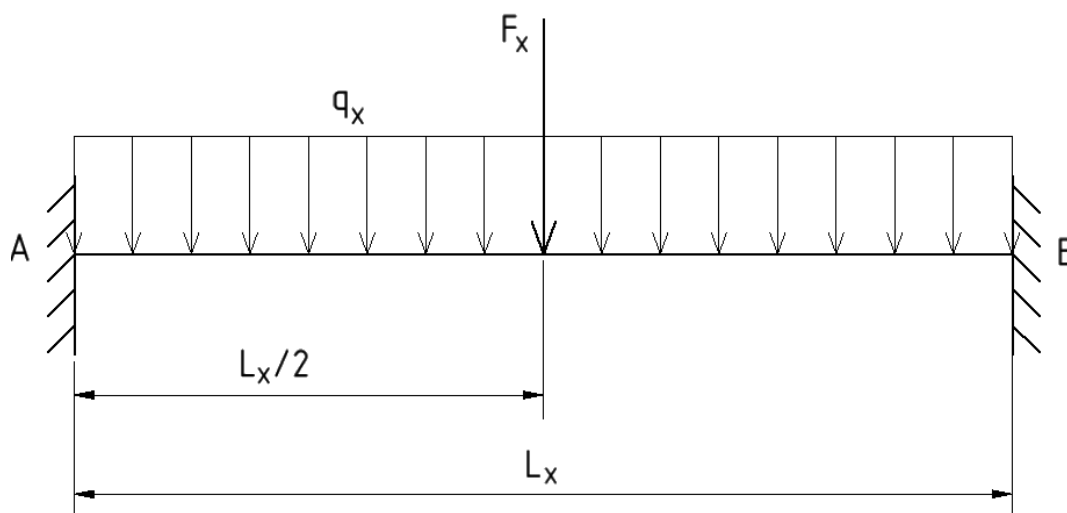
Kvadratický moment průřezu je zjištěn pomocí programu Creo Parametric 3.0. Ostatní parametry jsem převzal z katalogových listů [11]. Na obr. 4.1 je zobrazen profil konstrukčního hliníkového profilu použitý na konstrukci zařízení.



Obr. 4.1 – Základní schéma zatížení kontrolovaných profilů

4.1.1 Průhyb profilu osy X

Ve výpočtech dosazují délku profilů $L_x = 690$ mm. Hodnota hmotnosti $m_x = 0,85$ kg je určena pomocí programu Inventor Professional 2015 s dostatečnou rezervou. Výpočty 4.4 a 4.5 jsou dle [3].



Obr. 4.2 – Schéma zatížení profilu X

Zatížení vlastní tíhou profilu:

$$q_x = m_p \cdot g = 0,8 \cdot 9,81 = 7,8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4.1)$$

Zatížení profilu od nesených komponentů:

$$F_x = m_x \cdot g = 0,85 \cdot 9,81 = 8,3 \text{ N} \quad (4.2)$$

Průhyb od vlastní tíhy profilu:

$$w_{xq} = \frac{q_x \cdot L_x^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{7,8 \cdot 0,69^4}{384 \cdot 71 \cdot 10^9 \cdot 3,24 \cdot 10^{-8}} = 0,002 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Průhyb profilu od nesených komponentů:

$$w_{xF} = \frac{F_x \cdot L_x^3}{192 \cdot E \cdot I} = \frac{8,3 \cdot 0,69^3}{192 \cdot 71 \cdot 10^9 \cdot 3,24 \cdot 10^{-8}} = 0,006 \text{ mm} \quad (4.5)$$

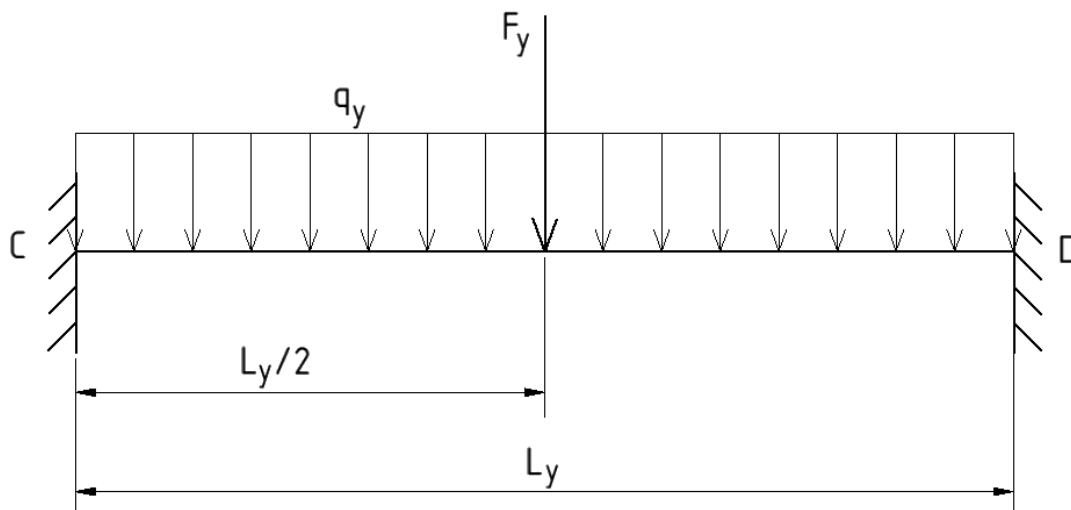
Celkový průhyb profilu osy X:

$$w_x = w_{xq} + w_{xF} = 0,002 + 0,006 = 0,008 \text{ mm} \quad (4.6)$$

Celkový průhyb nosníku $w_x < w_{Dov}$. Nosník X vyhovuje požadavkům.

4.1.2 Průhyb profilu osy Y

Ve výpočtech dosazují délku profilů $L_y = 890$ mm. Hodnota hmotnosti $m_y = 2$ kg je určena pomocí programu Inventor Professional 2015 s dostatečnou rezervou. Výpočty 4.9 a 4.10 jsou dle [3].



Obr. 4.3 – Schéma zatížení profilu Y

Zatížení vlastní tíhou profilu:

$$q_y = q_x = 7,8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4.7)$$

Zatížení profilu od nesených komponentů:

$$F_y = m_y \cdot g = 2 \cdot 9,81 = 19,6 \text{ N} \quad (4.8)$$

Průhyb od vlastní tíhy profilu:

$$w_{yq} = \frac{q_y \cdot L_y^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{7,8 \cdot 0,89^4}{384 \cdot 71 \cdot 10^9 \cdot 3,24 \cdot 10^{-8}} = 0,006 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Průhyb profilu od nesených komponentů:

$$w_{yF} = \frac{F_y \cdot L_y^3}{192 \cdot E \cdot I} = \frac{19,6 \cdot 0,89^3}{192 \cdot 71 \cdot 10^9 \cdot 3,24 \cdot 10^{-8}} = 0,031 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Celkový průhyb profilu osy Y:

$$w_y = w_{yq} + w_{yF} = 0,006 + 0,031 = 0,037 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Celkový průhyb nosníku $w_y < w_{Dov}$. Nosník Y vyhovuje požadavkům.

4.2 Kontrola použitých motorů

Z předešlých projektů jsou použity krokové motory SX17-1005LQCEF s přírubou NEMA17. V následující podkapitole jsou zjednodušeně kontrolovány, zda vyhovují následujícím požadavkům. Požadovaná rychlost pohonu os X i Y je $v_p = 3\,500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a zrychlení pohonu $a_p = 1\,500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$. Tyto hodnoty volím podle vlastních zkušeností. Při vyšší rychlosti než je v_p laser nestíhá gravírovat a výsledná práce by byla nekvalitní. Se zrychlením pohonu menším než a_p může docházet k nerovnoměrnému gravírování počátečních hran gravírovaného obrazu.

Rozběhová síla:

$$F_r = m_y \cdot a_p = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ N} \quad (4.12)$$

Ta udává, jaká síla je potřeba k rozpořhybování hmotnosti m_y se zrychlením a_p . V daném případě se tato síla rovná i potřebné síle pohonu pro rovnoměrný pohyb.

Točivý moment:

$$M_{kM} = F_r \cdot \frac{d_f}{2} = 3 \cdot \frac{12,7}{2} = 19,05 \text{ Nmm} \quad (4.13)$$

Potřebný točivý moment:

$$M_{kM} = M_{kM} \cdot \eta = 19,05 \cdot 3 = 57,15 \text{ Nmm} \quad (4.14)$$

Točivý moment motoru násobím vlastním koeficientem η , který představuje odpor valení koleček, účinnost řemenového převodu a další ostatní ztráty v pohonu.

Otáčky motoru při rovnoměrném pohybu:

Pro výpočet otáček motoru při rychlosti v_p je potřeba určit převodový poměr mezi pastorkem motoru a kolečkem pojezdu. Kolečko pojezdu má $\varnothing d_k = 32 \text{ mm}$.

$$i = \frac{n_M}{n_k} = \frac{d_k}{d_f} = \frac{32}{12,7} = 2,52 \quad (4.15)$$

kde:	n_M	Maximální požadované otáčky motoru	$[\text{min}^{-1}]$
	n_k	Maximální otáčky kolečka pohonu	$[\text{min}^{-1}]$

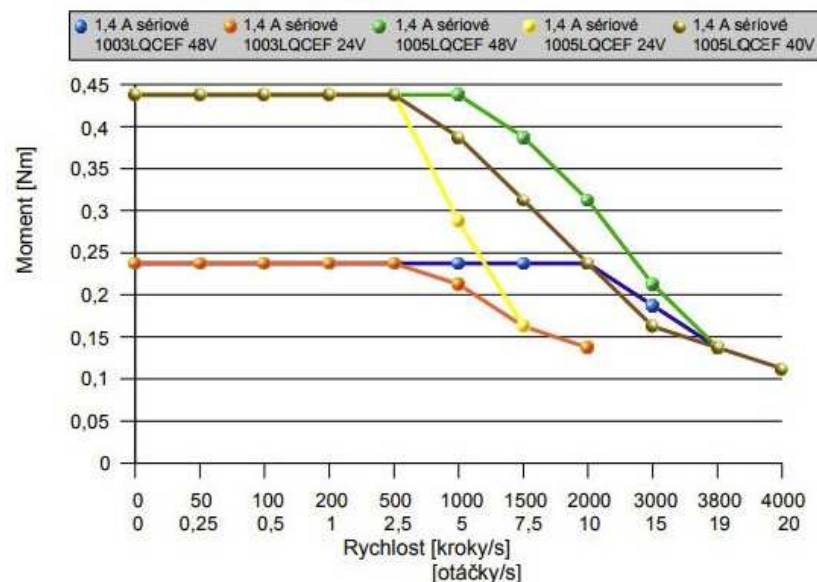
Dále je potřeba vypočítat n_k . To je počet otáček za minutu kolečka pojezdu, pro dosažení rychlosti $v_p = 3500 \text{ mm/min}$. Pro výpočet je nutné znát obvod kolečka.

$$o = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d_f}{2} = \pi \cdot 12,7 = 39,898 \text{ mm} \quad (4.16)$$

$$n_k = \frac{v_p}{o} = \frac{3500}{39,898} = 87,72 \text{ min}^{-1} \quad (4.17)$$

$$n_M = i \cdot n_k = 2,52 \cdot 87,72 = 221 \text{ min}^{-1} \quad (4.18)$$

Podle momentové charakteristiky v katalogu firmy Microcon [20] použité motory SX17-1005LQCEF 40V splňují zadané požadavky s dostatečnou rezervou.



Obr. 4.4 – Momentová charakteristika [19]

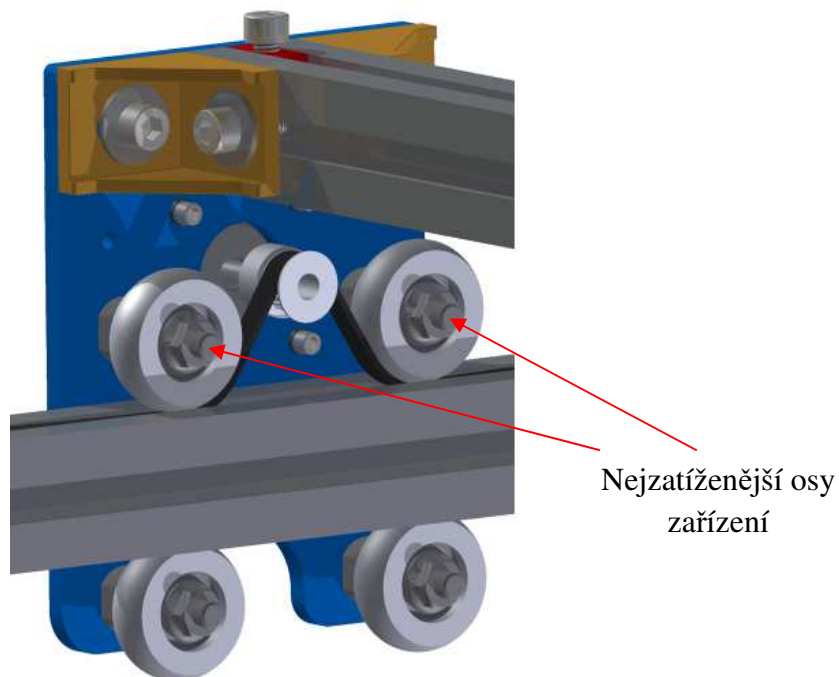
Požadovaná rychlost v_p a zrychlení a_p se nastavuje pomocí softwaru Grbl popsaném v kap.7. Za rychlost a zrychlení osy Z se nastavuje nulová hodnota, protože zařízení nemá posuv v dané ose. Tyto hodnoty se uloží do paměti EEPROM arduina a zůstanou přednastavené, proto se již v budoucnu nemusí znovu nastavovat.

Grbl					
Grbl \$\$ configuration					
#	Parameter	Value	Unit	Description	
\$110	X-axis maximum rate	3500,000	mm/min	X-axis maximum rate. Used as G0 rapid rate.	
\$111	Y-axis maximum rate	3500,000	mm/min	Y-axis maximum rate. Used as G0 rapid rate.	
\$112	Z-axis maximum rate	0,000	mm/min	Z-axis maximum rate. Used as G0 rapid rate.	
\$120	X-axis acceleration	1500,000	mm/sec^2	X-axis acceleration.	
\$121	Y-axis acceleration	1500,000	mm/sec^2	Y-axis acceleration.	
\$122	Z-axis acceleration	0,000	mm/sec^2	Z-axis acceleration.	

Obr. 4.5 – Nastavení rychlosti a zrychlení

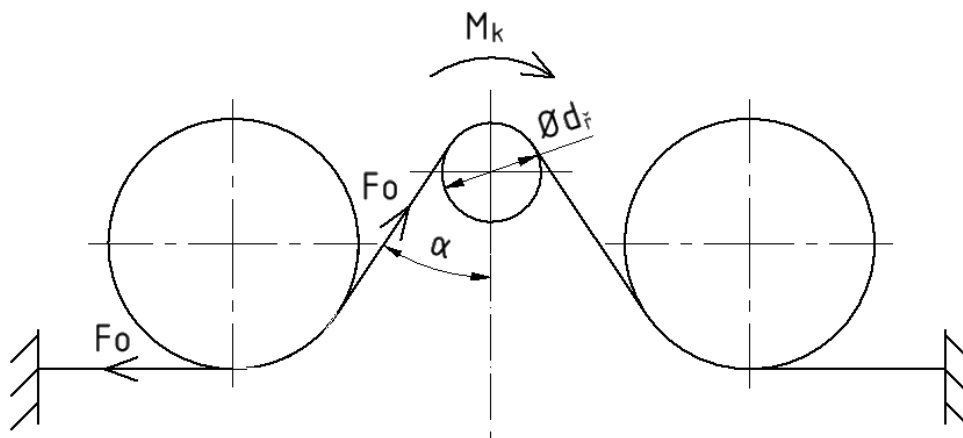
4.3 Zatížení a kontrola os kol

Nejvíce zatížené jsou horní dvě osy kol od pojezdu Y. Tyto osy jsou zatěžovány hmotností osy X a všech částí na něm uloženém. Dalším zatížením je vlastní hmotnost pojezdu osy Y, síly od motoru pohonu a síla předpětí řemene.



Obr. 4.6 – Pojezd osy Y

Zatížení a průhyby jsou počítány za předpokladu zabrzděných pojezdových kol. Tento případ v běžném provozu nenastává proto za splnění všech podmínek se výpočty přiklání na stranu bezpečnosti.



Obr. 4.7 – Schéma působení obvodové síly

Ze známého točivého momentu se vypočte obvodová síla a následně síla F_v působící od pohonu na osu kolečka. Tato výsledná síla F_v se vypočte dosazením do kosinovy věty. Úhel α je převzat z modelu pomocí programu Inventor Professional.

Obecný vzorec:

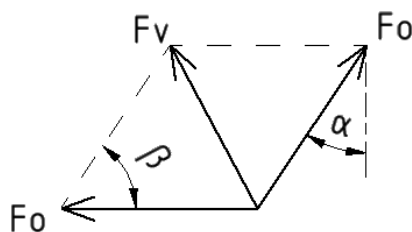
$$M_k = F \cdot \frac{d}{2} \quad (4.19)$$

Výpočet obvodové síly:

$$F_O' = \frac{2 \cdot M_k}{d_f} = \frac{2 \cdot 0,52}{0,0127} = 81,9 \text{ N} \quad (4.20)$$

K této síle se připočte síla předpětí řemenu. Předpětí je nutné, aby ozubený řemen nepřeskakoval zuby řemenice. Tuto sílu po konzultaci s vedoucím diplomové práce volím $F_{PŘ} = 10 \text{ N}$.

$$F_O = F_O' + F_{PŘ} = 81,9 + 10 = 91,9 \text{ N} \quad (4.21)$$



Obr. 4.8 – Schéma zatěžující síly F_V

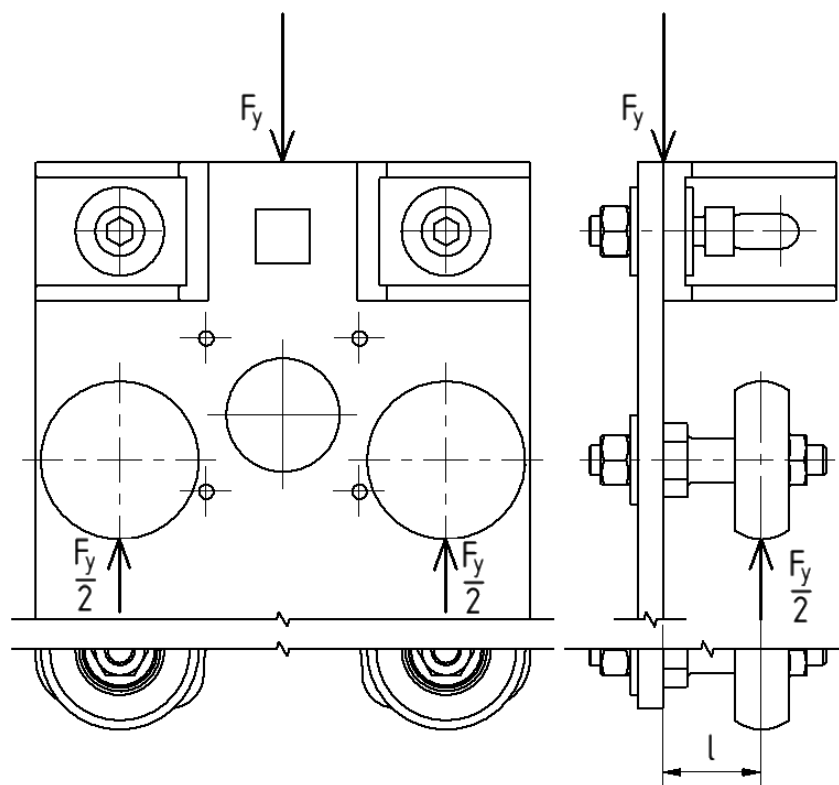
Určení úhlu β :

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 33,8^\circ = 56,2^\circ \quad (4.22)$$

Výsledné zatížení osy kola od pohonu:

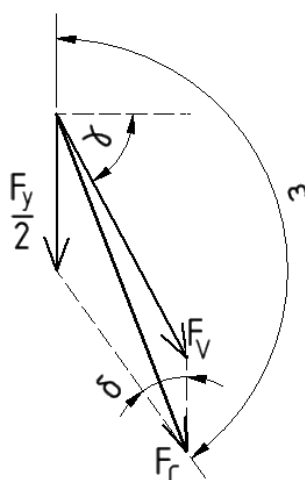
$$F_V = \sqrt{2 \cdot F_O^2 - 2 \cdot F_O^2 \cdot \cos \beta} = \sqrt{2 \cdot 91,9^2 - 2 \cdot 91,9^2 \cdot \cos 56,2^\circ} = 86,6 \text{ N} \quad (4.23)$$

Vypočtená síla působí na osu při maximálním točivém momentu daného motoru a dopnutí řemene. Další částí je výpočet celkového zatížení osy silou F_c . Tato síla je výslednicí síly F_V a síly od hmotnosti nesených součástí F_y .



Obr. 4.9 – Schéma zatěžující síly F_y

Síla F_y zatěžuje dvě osy najednou, proto počítám pouze s poloviční silou. Tato síla je vypočtena v předešlé podkapitole. Směr sil v obr. 4.10 je opačný z důvodu větší přehlednosti. Na výslednou číselnou hodnotu tato změna nemá vliv.



Obr. 4.10 – Schéma výsledné síly F_c

Určení úhlu ε :

Úhel ε je nutné určit pro výpočet celkové síly osy F_c .

$$\varepsilon = \frac{360^\circ - 2 \cdot \delta}{2} = \frac{360^\circ - 2 \cdot (90^\circ - \gamma)}{2} = \frac{360^\circ - 2 \cdot (90^\circ - \frac{180^\circ - \beta}{2})}{2} = 151,9^\circ \quad (4.24)$$

Celkové zatížení osy kola:

$$F_C = \sqrt{\left(\frac{F_y}{2}\right)^2 + F_V^2 - 2 \cdot \frac{F_y}{2} \cdot F_V \cdot \cos \gamma} \quad (4.25)$$

Po dosazení:

$$F_C = \sqrt{\left(\frac{19,6}{2}\right)^2 + 86,6^2 - 2 \cdot \frac{19,6}{2} \cdot 86,6 \cdot \cos 151,9} = 95,4 \text{ N} \quad (4.26)$$

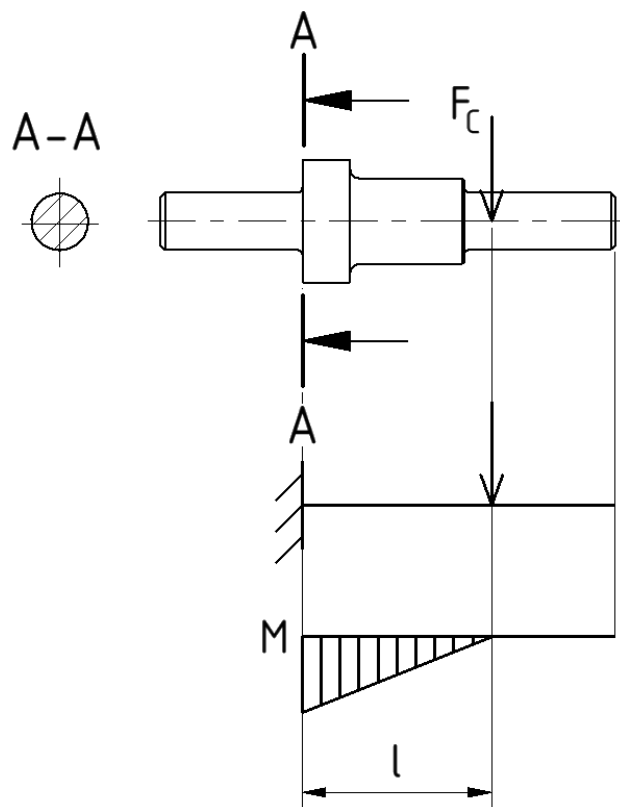
Touto silou kontroluji osu kola a trvanlivost jeho ložiska.

Kontrola osy kola:

Osa je kontrolována v místě průřezu s maximálním ohybovým momentem dle [4].

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \cdot \alpha_{Mo} \quad (4.27)$$

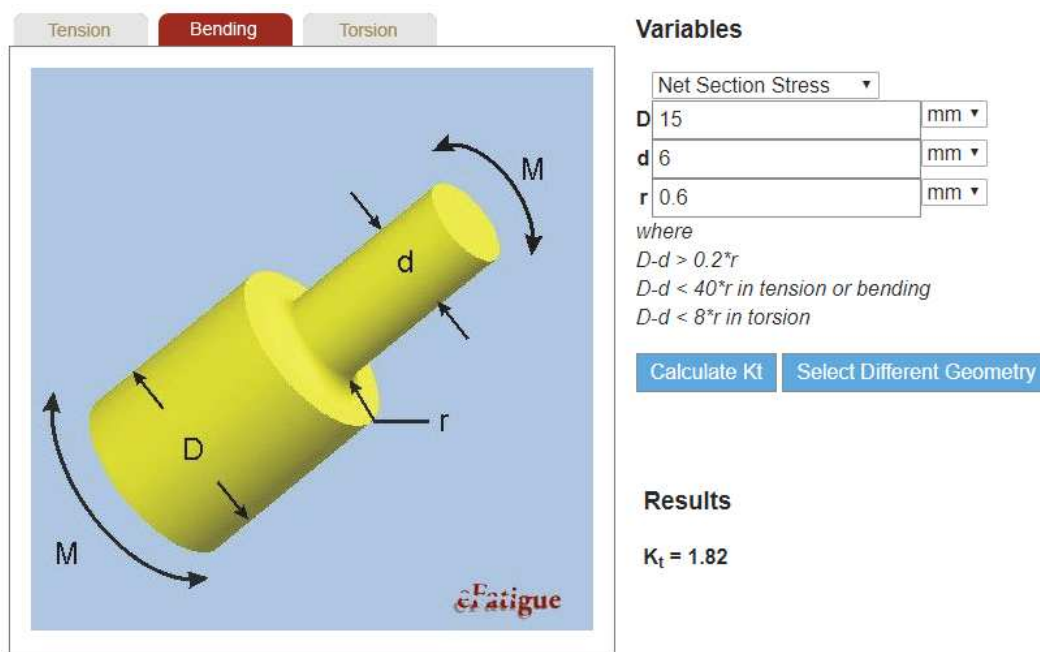
Pro výpočet vzorce 4.27 je potřeba znát M_o a W_o . Tento ohybový moment vzniká od působení síly F_C na rameni l . Délka $l = 20 \text{ mm}$ je patrná z následujícího obrázku.



Obr. 4.11 – Schéma kontrolovaného místa na ose

Modul průřezu v ohybu je počítán v kritickém místě A s $\varnothing d = 6$ mm. Výsledná bezpečnost je počítána pro materiál ČSN 11 523 s mezí kluzu $R_e = 355$ MPa [2] a musím vyhovovat podmínce $k_{sDOV} \geq 1,5$.

Součinitel koncentrace napětí pro ohyb α_{M_0} jsem stanovil pomocí webové stránky eFatigue.com [10]. Tento součinitel pro dané průměry a poloměr zaoblení je $\alpha_{M_0} = 1,82$. Na obr. 4.12 je zobrazeno postup stanovení této hodnoty.



Obr. 4.12 – Stanovení součinitele koncentrace napětí $K_t = \alpha_{M_0}$ [10]

Ohybový moment:

$$M_0 = F_C \cdot l = 95,4 \cdot 20 = 1\,908 \text{ Nmm} \quad (4.28)$$

Modul průřezu v ohybu:

$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 6^3}{32} = 21,2 \text{ mm}^3 \quad (4.29)$$

Po dosazení do vzorce 4.20:

$$\sigma_0 = \frac{1\,908}{21,2} \cdot 1,82 = 163,8 \text{ MPa} \quad (4.30)$$

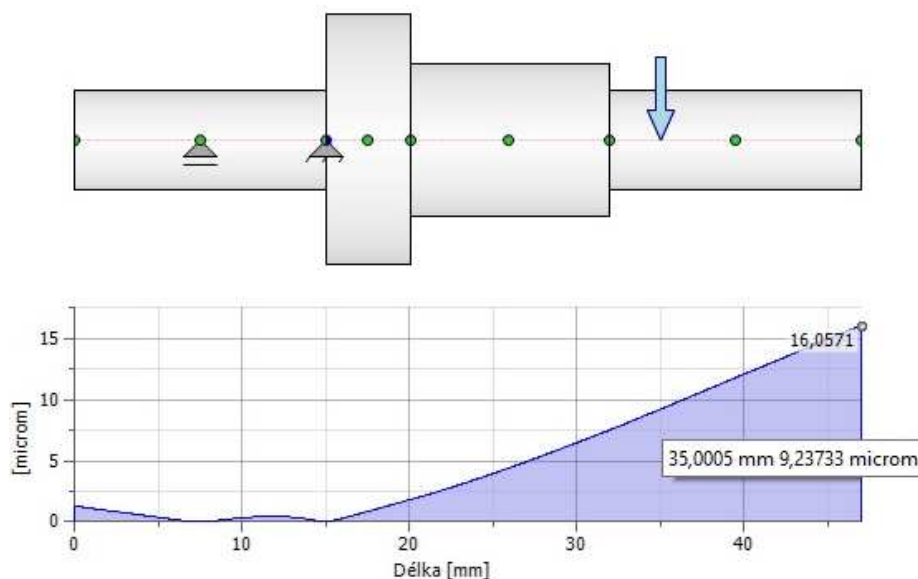
Výsledná bezpečnost:

$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_0} = \frac{355}{163,8} = 2,2 \quad (4.31)$$

Výsledná bezpečnost splňuje podmínku $k_s \leq k_{sDOV}$.

Průhyb osy:

Při zatěžování silou F_C dochází k průhybu osy kolečka. Tuto hodnotu je nutné kontrolovat z důvodu vyloučení ovlivnění gravírování z důvodu rozostření laseru. Průhyb osy je řešen pomocí programu Inventor Professional. V programu nelze nastavit vetknutá vazba, proto jsem uložil osu do pevné a posuvné vazby. Výsledná hodnota se tím nezmění.



Obr. 4.13 – Výsledný průhyb osy

Průhyb v místě působení síly F_C je asi 0,001 mm. Největší průhyb 0,016 mm je na konci osy. Výsledné průhyby při maximálním zatížení jsou zcela zanedbatelné. Stávající konstrukce osy je vyhovující. Na obr. 4.14 jsou zobrazeny polotovary a osa, když jsem je vyráběl doma na soustruhu PROMA SE-300E.



Obr. 4.14 – Vyrobená osa kolečka před řezáním závitu M6

4.4 Kontrola trvanlivosti ložisek kol

Ve všech kolečkách pojezdů jsou jednořadá kuličková ložiska typu SKF 636-2RZ. Ty jsou pevně uložena již z výroby. Při poškození ložisek je potřeba vyměnit celé toto pojezdové kolečko.

Tab. 4.2 – Parametry ložiska SKF 636-2RZ [24]

Typ ložiska	Základní dynamická únosnost C (kN)	Základní statická únosnost C ₀ (kN)	Mezní otáčky (min ⁻¹)	Hmotnost (kg)
636-2RZ	1,99	0,78	38 000	0,013

Základní trvanlivost ložiska:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (4.32)$$

kde: L_{10} Základní trvanlivost (při 90% spolehlivosti) [mil. ot.]
 $P = F_C$ Ekvivalentní zatížení [N]
 C Základní dynamická únosnost [N]
 p Exponent rovnice ($p = 3$ pro ložiska s bodovým stykem)

Po dosazení:

$$L_{10} = \left(\frac{1\,990}{95,4} \right)^3 = 9\,076 \text{ mil. otáček} \quad (4.33)$$

Trvanlivost ložiska v provozních hodinách:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{10} \quad (4.34)$$

kde: L_{10h} Provozní trvanlivost [hod]
 $n = n_k$ Maximální otáčky kolečka [min⁻¹]

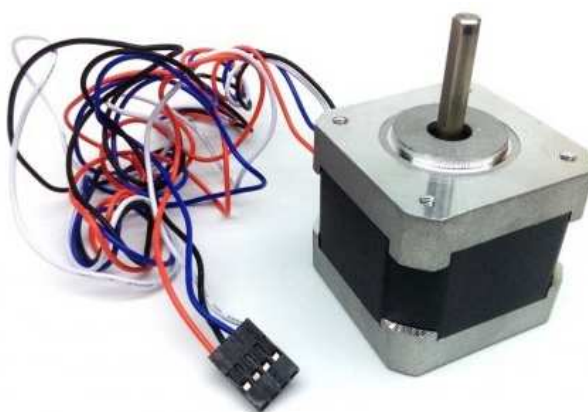
Po dosazení:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot 87,72} \cdot 9\,076 = 1\,724\,426 \text{ hod} \quad (4.35)$$

Trvanlivost ložiska SKF 636-2RZ uložené v kolečku pojezdu odpovídá asi 197 let při nepřetržitém provozu, nedojde-li k jinému jeho poškození.

5. Pohonné zařízení

Pro pohon jsou použity bipolární krokové motory SX17-1005LQCEF firmy Microcon [20], které jsem již měl doma z jiných projektů. Vyznačují se vysokými momenty při malých konstrukčních rozměrech. Používají se zejména při stavbách domácích 3D tiskáren z důvodu nízké ceny a bezúdržbové konstrukci. Pro danou konstrukci budou potřeba celkem tři krokové motory. Jeden pro pohyb v ose X a dva motory pro osu Y. V tab.1 jsou technické parametry použitých motorů.



Obr. 5.1 – Krokový motor Microcon

Tab. 5.1 – Technické parametry krokových motorů Microcon [20]

Typ	Točivý moment (Nm)	Jmenovitý proud I_{max} (A)	Odpor (Ω)	Hmotnost (kg)	Délka kroku ($^\circ$)
SX17-1005LQCEF	0,52	1	5,9	0,3	1,8

Přesnost polohování stroje je závislá na délce posuvu krokového motoru při jednom jeho kroku. Pro zachycení detailů při laserovém gravírování je potřeba ze zkušeností minimální posuv 0,1 mm na jeden krok motoru.

Výpočet počtu kroků za jednu otáčku

Krokové motory mají dle tab. 5.1 délku úhlového kroku $1,8^\circ$ proto platí:

$$n_{\text{tot}} = \frac{360}{1,8} = 200 \text{ kroků} \quad (5.1)$$

Výpočet délky posuvu za jednu otáčku

Rotační pohyb motoru je převáděn na lineární pohyb přes řemenici se středním průměrem $d_f = 12,7 \text{ mm}$.

Obvod kolečka o je vypočten ve vzorci 4.16.

$$l_{xy} = \frac{o}{n_{\text{tot}}} = \frac{39,898}{200} = 0,199 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Vypočtenou délka l_{xy} lze ještě upravit pomocí CNC shieldu rozdělením jednoho kroku na čtyři mikrokroky. Shield je popsán v následující podkapitole. Pro skutečnou délku L_{xy} tedy platí:

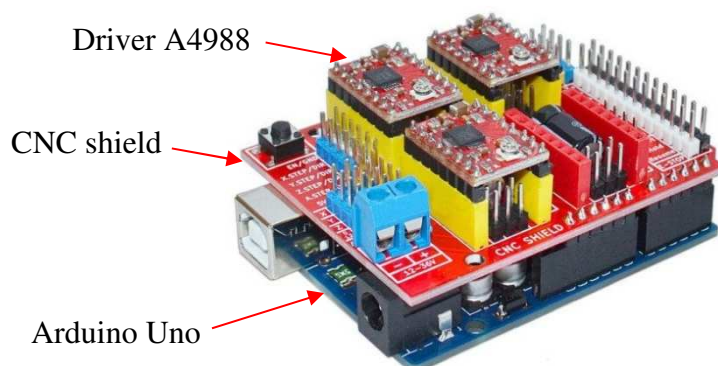
$$L_{xy} = \frac{o}{4 \cdot n} = \frac{39,898}{4 \cdot 200} = 0,049 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Vypočtená skutečná minimální délka kroku posuvu L_{xy} vyhovuje.

5.1 Shield

K ovládání krokových motorů je zapotřebí ovladače (driveru). Ten napájí motor impulsy stejnosměrného proudu. Pro danou konstrukci vybírám rozšiřující modul CNC Shield v3.0 do základní desky platformy Arduino Uno se sloty pro dané ovladače. Tato deska je kompatibilní s programem GRBL vytvářející G-kódy a ovládá krokové motory.

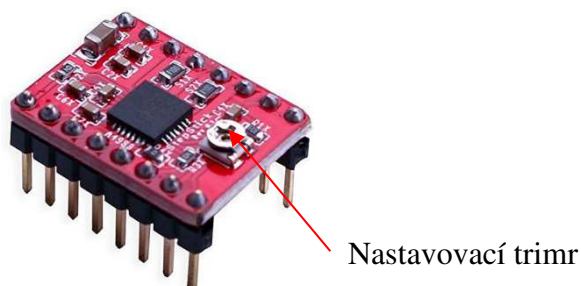
Použitý CNC Shield umožňuje šest různých rozšíření krokování: celokrok 1/1 a mikrokrokování 1/2, 1/4, kterou nastavuji pomocí jumperů na shieldu a dále 1/8 a 1/16 kroku. Tento modul je vhodný pro CNC zařízení, 3D tiskárny apod. Obsahuje čtyři sloty pro drivery, piny pro zapojení koncových spínačů a piny pro spínání vřetena v tomhle případě laseru. Tři sloty slouží pro osy X,Y,Z a čtvrtý slot pro klonování osy, který využívám pro duplikaci osy Y, protože na téhle ose mám dva krokové motory. Běžnými ovladači jsou DRV8825 a A4988. Shield je napájen spínaným zdrojem firmy Mean Well s označením LPV-60-12.



Obr. 5.2 –Arduino Uno, CNC shield a drivery A4988 [23]

5.2 Drivery A4988

Kvůli větším zkušenostem s A4988 jsem se rozhodl použít tento driver Allegro A4988 DMOS. Tento ovladač umožňuje řídit rychlost a směr otáčení krokového motoru až do 1A na jedné fázi, což vyhovuje použitým motorům.



Obr. 5.3 – Driver A4988 [21]

Velmi důležité je správné nastavení proudového omezení pro daný typ motoru a následná kontrola teploty chipu driveru. K nastavení je potřeba znát parametry z tab. 5.2 a velikost odporů.

Tab. 5.2 – Parametry driveru A4988 [21]

Typ	Napájecí napětí (V)	Výstupní proud na jednu fázi (A)	Max. proudový odběr (A)	Max. pracovní teplota (°C)
A4988	8 ÷ 35	1	2,15	85

Velikost odporů si vždy pro přesnost výpočtu přeměřuji pomocí ohmmetru. Na daném driveru jsem naměřil hodnotu $R_s = 0,12 \Omega$.

Proudové omezení spočívá v nastavení maximálního proudu protékajícím driverem, který je stanoven jmenovitým proudem motoru I_{\max} z tab.5.1. To se provádí pomocí trimeru, kterým se musí nastavit napětí V_{Ref} na pinu "ref". Tohle napětí se musí vypočítat ze základního vzorce pro proudové omezení ovladačů A4988 [21].

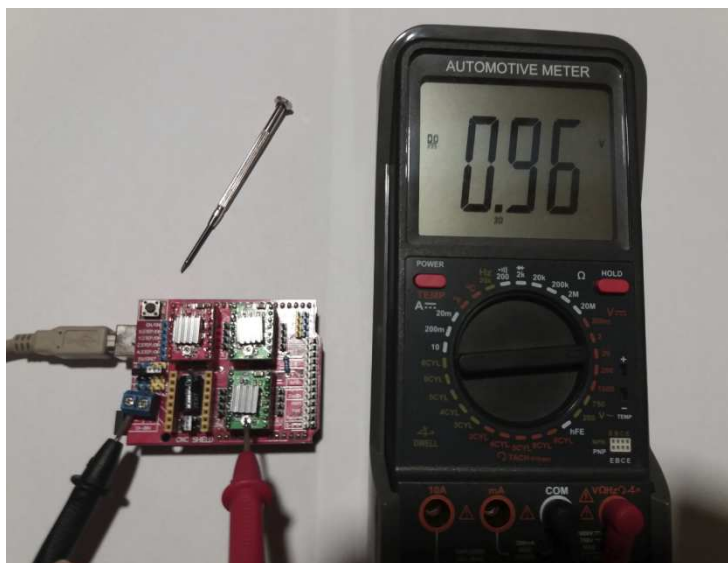
Výpočet napětí V_{Ref}

$$I_{\max} = \frac{V_{\text{Ref}}}{8 \cdot R_s} \quad (5.4)$$

$$V_{\text{Ref}} = 8 \cdot R_s \cdot I_{\max} = 8 \cdot 0,12 \cdot 1 = 0,96 \text{ V} = 960 \text{ mV} \quad (5.5)$$

Při větším nastavení napětí než je vypočtená hodnota V_{Ref} hrozí spálení driveru a krokového motoru. Na obr. 5.4 je zobrazeno nastavení vypočteného napětí V_{Ref} pomocí voltmetru. Záporná svorka voltmetru se připojí k zápornému kolíku CNC shieldu a kladná

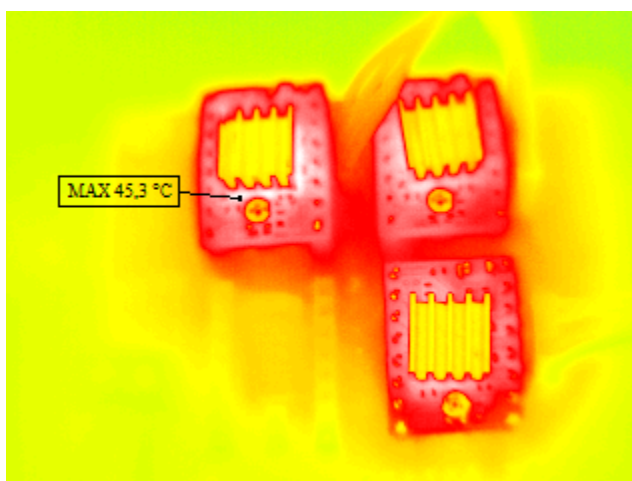
svorka voltmetru se spojí s trimrem ovladače. Dále pootočením trimru se nastaví vypočtené napětí. Toto nastavení se vždy provádí pro každý driver zvlášť.



Obr. 5.4 – Nastavení napětí V_{Ref}

Kontrola teploty driveru v provozu stroje

Ovladače A4988 mají vlastní chladiče odvádějící teplo do prostoru. Přesto můžou nastat případy přehřívání či následně spálení z důvodů vyšší teploty než je maximální pracovní teplota z tab. 5.2. V případě přehřívání se musí snížit napětí V_{Ref} na trimru, kterým se sníží vstupní proud do motoru. Tím se docílí menšího zahřívání ovladače A4988. Na obr. 5.5 je zobrazen snímek maximálního zahřívání za provozu stroje z termokamery Fluke TIS 40.

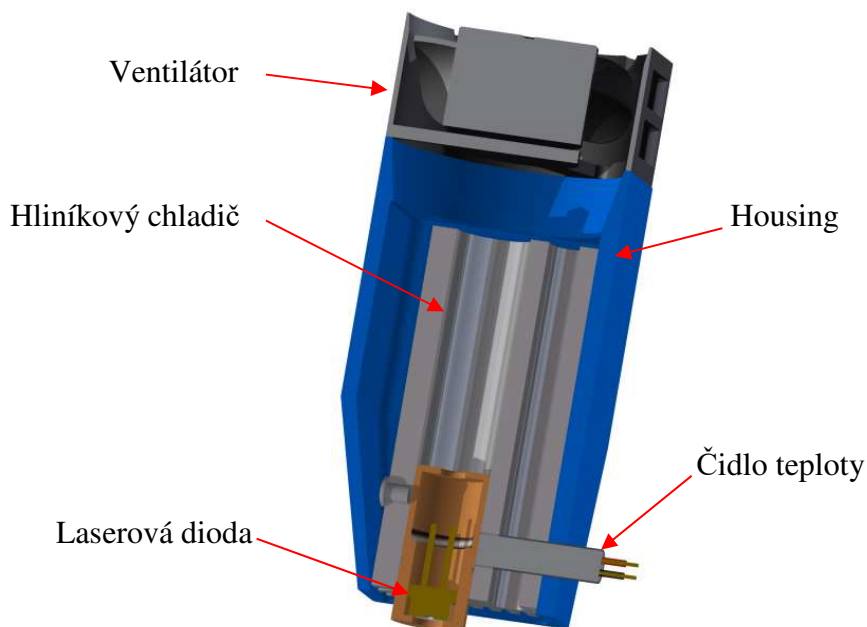


Obr. 5.5 – Snímek z termokamery Fluke TIS 40

Maximální teplota pro zkušební dobu nepřesahuje stanovený limit výrobce [21]. Tímto lze usoudit, že motory jsou nastaveny správně a není dále potřeba řešit jejich dodatečné nastavení či přídavné chlazení ovladačů A4988.

6. Laserový modul

Laserový modul je sestava částí sloužící k chlazení a připevnění laserové diody ke gravírovacímu zařízení. Měděné pouzdro laserové diody by nemělo přesáhnout dle výrobce hranici 40°C [9]. Při překročení této hodnoty může dojít k jejímu spálení. Proto se dioda ukládá do hliníkového chladiče odvádějícího teplo z povrchu pouzdra.



Obr. 6.1 – Řez laserového modulu

6.1 Laserová dioda

Pro dané gravírovací zařízení jsem se rozhodl vybrat 6W laserovou diodu NUBM44 firmy DTR-Laser z USA [9]. Je to polovodičová dioda pracující s vlnovou délkou 450nm vhodná pro gravírování dřeva a jiných organických materiálů. Je uložena v měděném pouzdře o průměru 12 mm a délce 30 mm. Důležitou součástí je skleněná čočka zajišťující zaostření paprsku na obráběný předmět. Pouzdro je připevněno k hliníkovému chladiči dvěma šrouby M3. Na kontaktní plochy mezi chladičem a pouzdrem je nanесena teplovodivá pasta Arctic MX-4 s vysokou tepelnou vodivostí pro lepší přenos tepla.



Obr. 6.2 – 6W laserová dioda v měděném pouzdře

Důležitou součástí je skleněná čočka zajišťující zaostření paprsku na obráběný předmět. Vybral jsem čočku G-2 patřící k nejkvalitnějším. Ohnisková vzdálenost tohoto objektivu se pohybuje v rozmezí $35 \div 50$ mm od obrobku.

Napájecí ovladač laseru

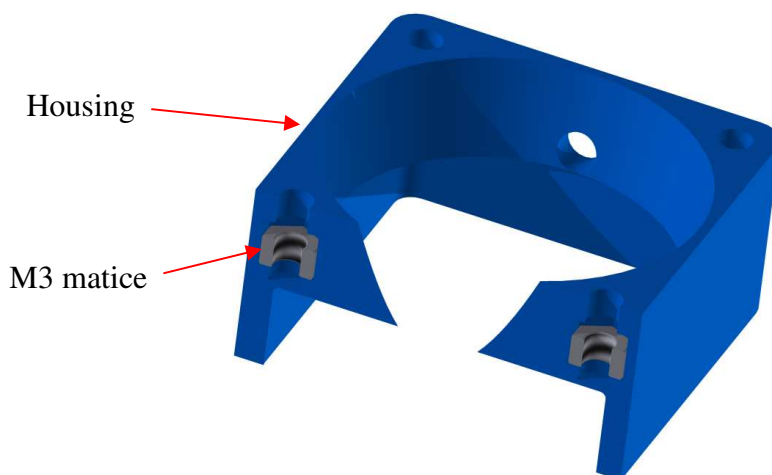
Laserové diody mají nízkou impedanci ve voltampérové charakteristice proto se musí napájet proudovými zdroji. Ty dodávají konstantní proud i při změně zátěže. Pro dané zařízení jsem zvolil vysokorychlostní ovladač firmy J-Tech vyhovující pro 6W laserové diody a kompatibilitou s použitou platformou Arduino. Ovladač je napájen spínaným zdrojem firmy Mean Well s označením APV-35-12.



Obr. 6.3 – Vysokorychlostní ovladač laseru [14]

6.2 Housing

Z důvodu zvýšení účinnosti chladiče a tím prodloužení životnosti diody jsem navrhl vlastní housing ve kterém je uložen chladič s diodou. Tuto součást jsem navrhoval s ohledem na princip Bernoulliho principu. Největší průřez přechází do nejmenšího průřezu v místě uložení diody a tím dochází ke zvýšení rychlosti proudícího vzduchu odebírajícího teplo z povrchu chladiče.

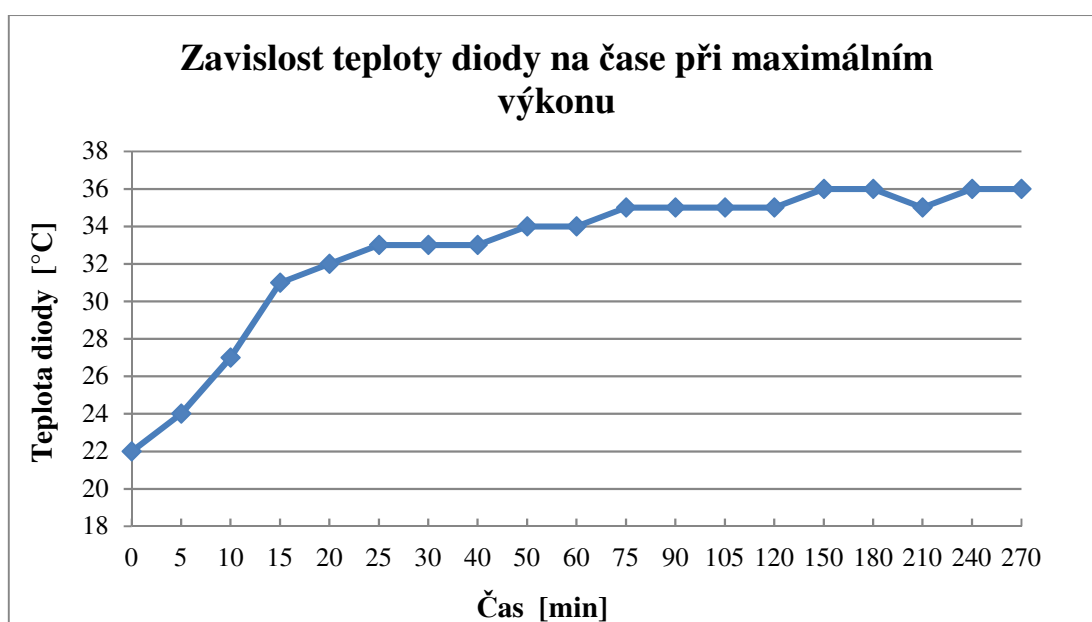


Obr. 6.4 – Detail zatisknutých M3 matic

Housing je vyroben na 3D tiskárně z modrého materiálu PETG. Horní část slouží jako příruba pro připevnění ventilátoru zajišťující proudění vzduchu. Přírubu jsem navrhl pomocí zatisknutí M3 matic do housingu z důvodu větší pevnosti a trvanlivosti závitů oproti závitům vyřezaným do plastu. Součástí laserového modulu je teplotní čidlo ukazující aktuální teplotu pouzdra laseru na displeji uloženém na řídicím panelu zařízení.

Kontrola teploty při maximálním výkonu laseru

Kontrolu jsem provedl zapisováním hodnot teploty v krátkých časových úsecích. Laserová dioda byla nastavena na maximální možný výkon. Hodnoty jsem odečítal z displeje teplotního čidla udávající teplotu pouzdra diody. Tato hodnota dle výrobce nesmí po delší dobu přesahovat teplotu 40 °C [9]. Na obr. 6.5 jsou zapsány naměřené hodnoty závislosti teploty na čase.



Obr. 6.5 – Závislost teploty diody na čase

Kontrola probíhala v pokojové teplotě okolo 22 °C. Z grafu lze vidět, že teplota diody se ustálila při maximálním výkonu za určitý čas okolo 36 °C. V reálném pracovním provozu bude stroj pracovat ve střídavém režimu výkonu, proto je test velmi předimenzován. Teplota nepřesáhla mezní hranici výrobce a proto navržený laserový modul vyhovuje.

7. Software

Kapitola zabývající se potřebným softwarem a programy pro nastavení a obsluhu gravírovacího zařízení. Komunikace mezi PC a hardware Arduino probíhá přes USB port.

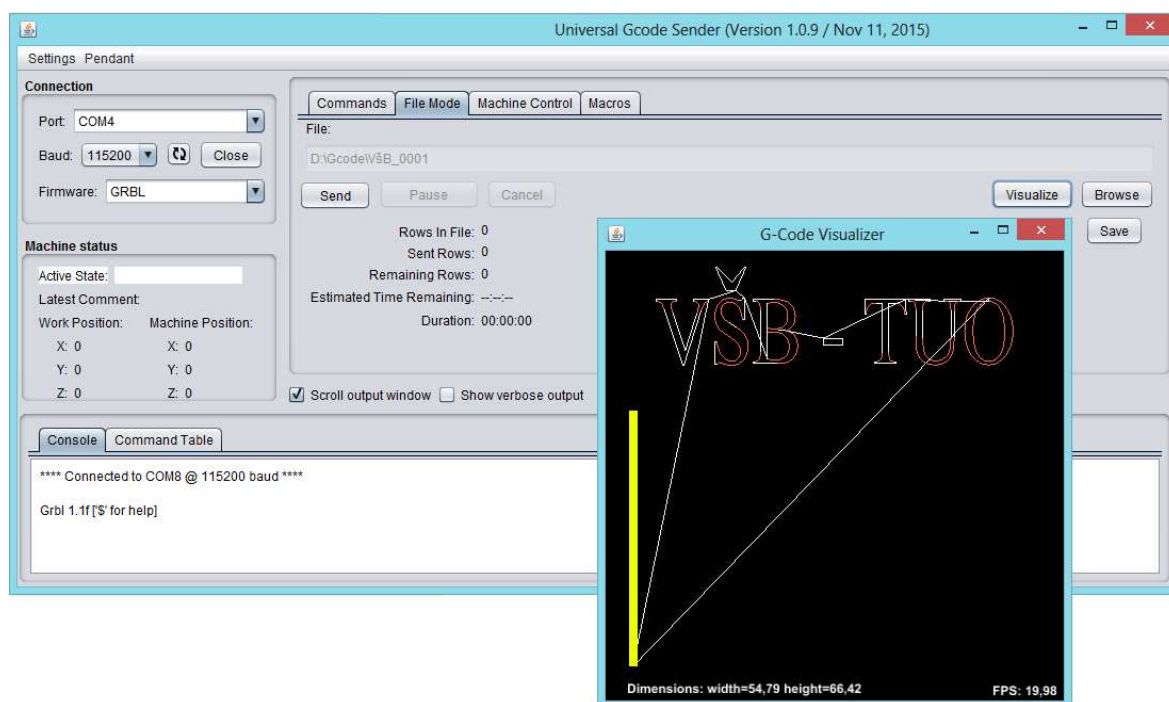
7.1 Arduino IDE

Vývojové prostředí sloužící pro psaní, kompilaci a upload kódu na desku Arduino. Pomocí IDE se nahraje program GRBL [23] na desku Arduino Uno. Je to softwarový ovladač krokových motorů pro CNC stroje využívající k pohonu danou platformu.

7.2 Universal Gcode Sender

Program pro ovládání a nastavení CNC zařízení. Je to freeware software s pokročilým nastavením CNC řadiče GRBL. Pro přesné nastavení posuvu je nutné zapsat hodnoty vypočtené z kap. 5. Nastavení maximální rychlosti a zrychlení os lze kromě výpočtu také zjistit při postupném zvyšování hodnot až do hranice, kdy motory začínají hlasitě pracovat a přeskakovat kroky. Od téhle absolutní maximální hranice se odečte 10 ÷ 20 % hodnoty. Tímto se docílí maximálního využití motorů.

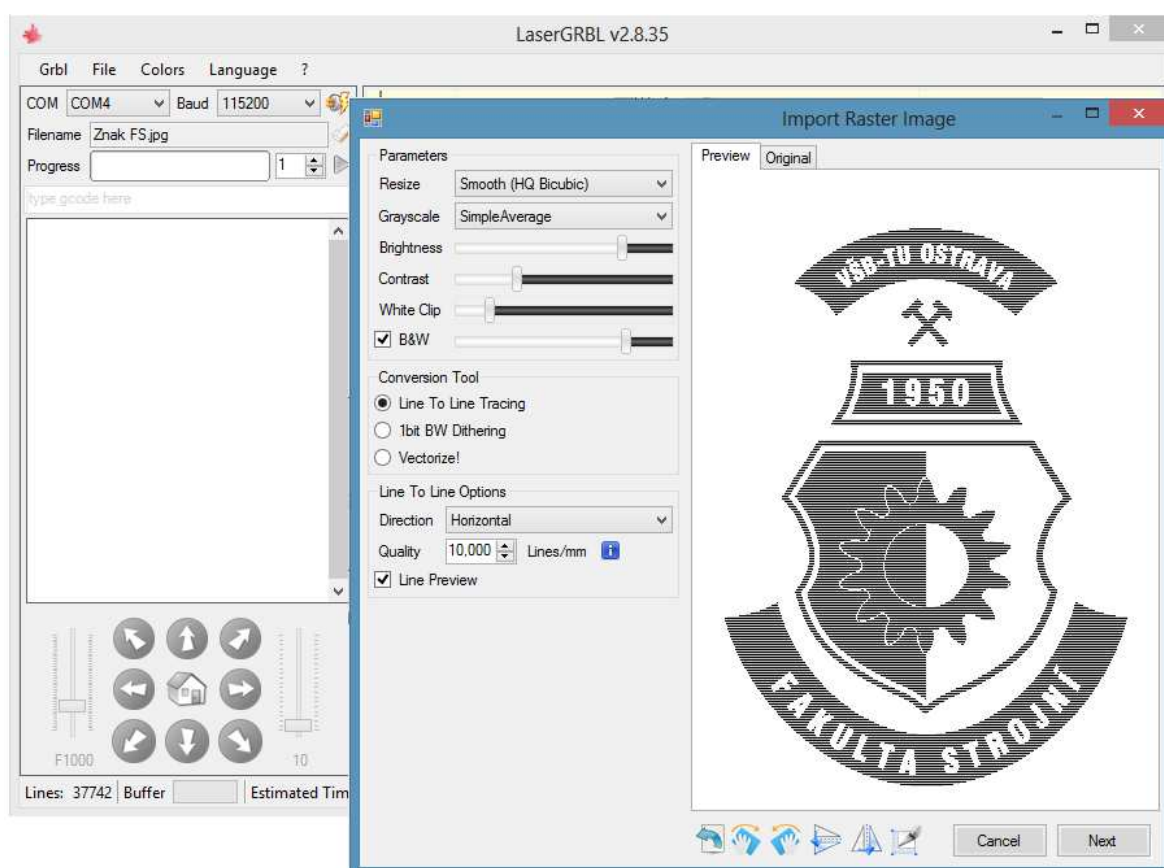
Tento program zpracovává G-kód, který musí být již v jiném programu vygenerován. Je to programovací jazyk řídící NC a CNC stroje. Na obr. 7.1 je zobrazena trasa laseru při gravírování nápisu VŠB - TUO.



Obr. 7.1 – Universal Gcode Sender

7.3 Laser GRBL

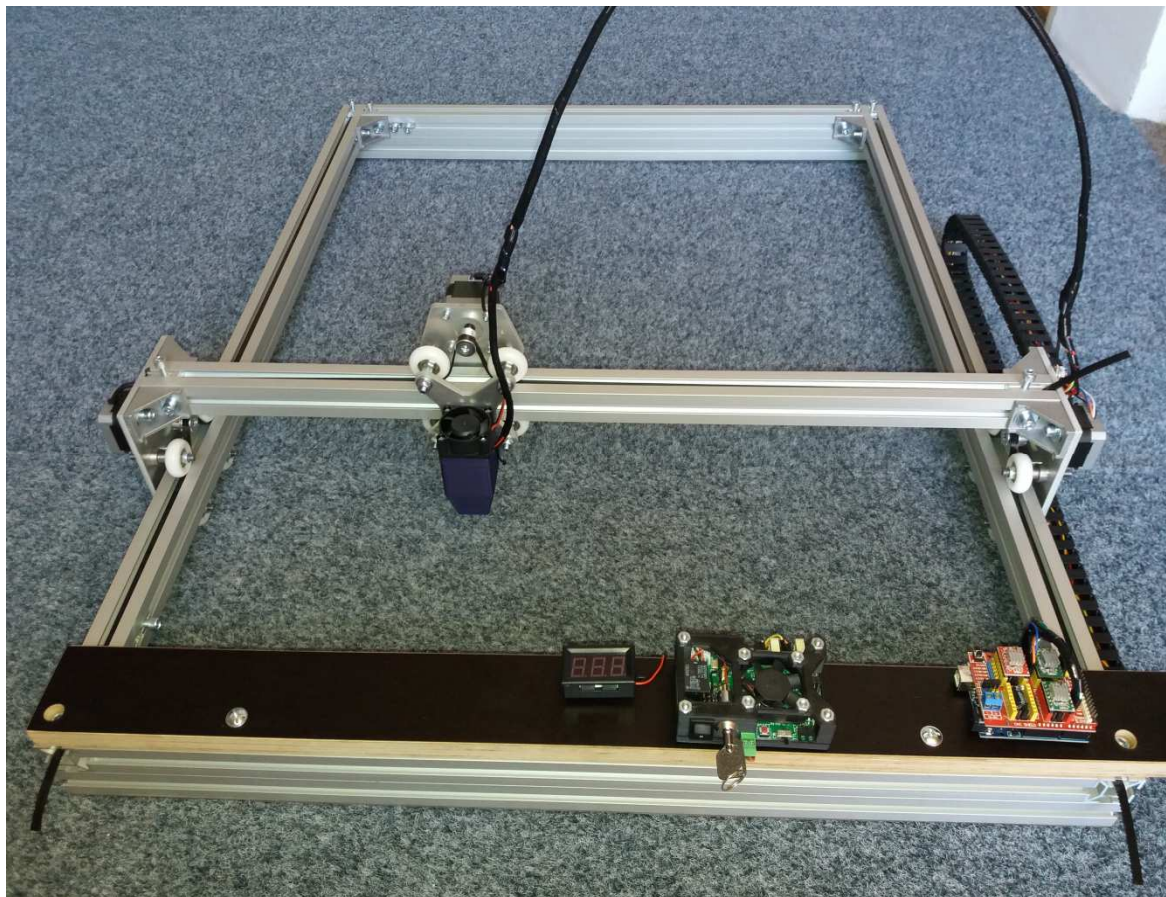
Opensource program, který používám pro generování G-kódu textu, obrázků a fotek. Zobrazuje průběh gravírování, předběžnou délku zpracování a aktuální pozici laseru. Výhodou jsou úpravy jasu, kontrastu a nastavení kvality výsledného gravírovaného objektu. Dále možnost vytvářet objekt pomocí vektorového obrysu či využití stínování. Umožňuje manuální polohování, předepsání rychlosti a výkonu laseru. Nevýhodou je vytváření G-kódu a jeho zobrazení až v průběhu gravírování proto editace je možná až po skončení práce. Na obr. 7.2 je zobrazeno možné nastavení pro znaky a loga.



Obr. 7.2 – Program Laser GRBL, příklad nastavení

8. Vyrobené gravírovací zařízení

Gravírovací zařízení, kterým se zabývá tato diplomová práce, jsem začal stavět v lednu roku 2018. Zprovoznění proběhlo v květnu 2018. Stroj má pracovní plochu větší než 700 x 500 mm, čím splnil zadanou podmínku. Na obr. 8.1 je zobrazeno hotové zařízení připravené ke gravírování.



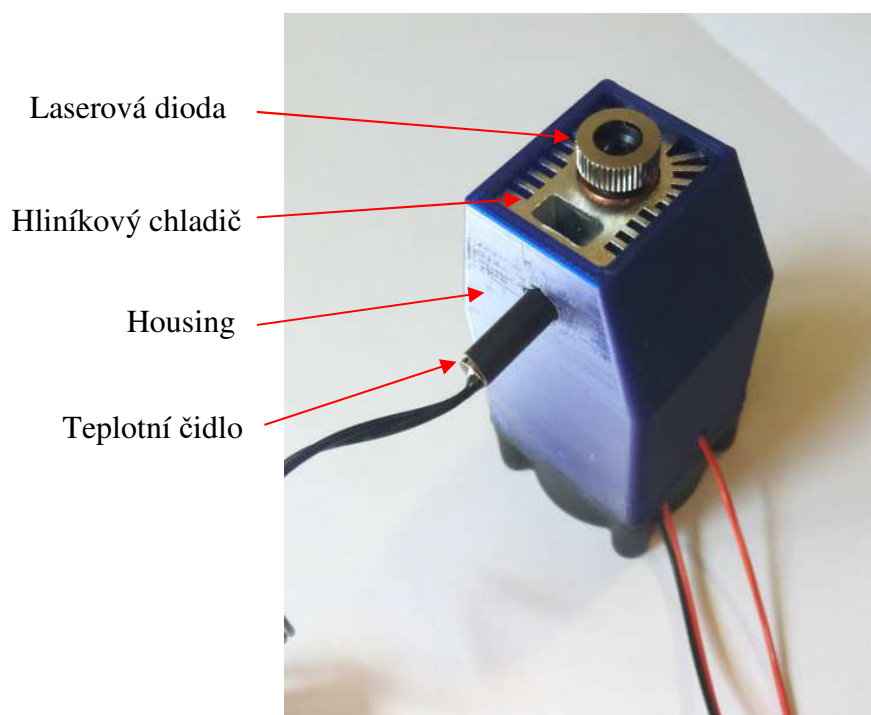
Obr. 8.1 – Hotové gravírovací zařízení

Na obr. 8.2 je zhotovená balsová cedulka, která sloužila k prvním zkouškám laseru.



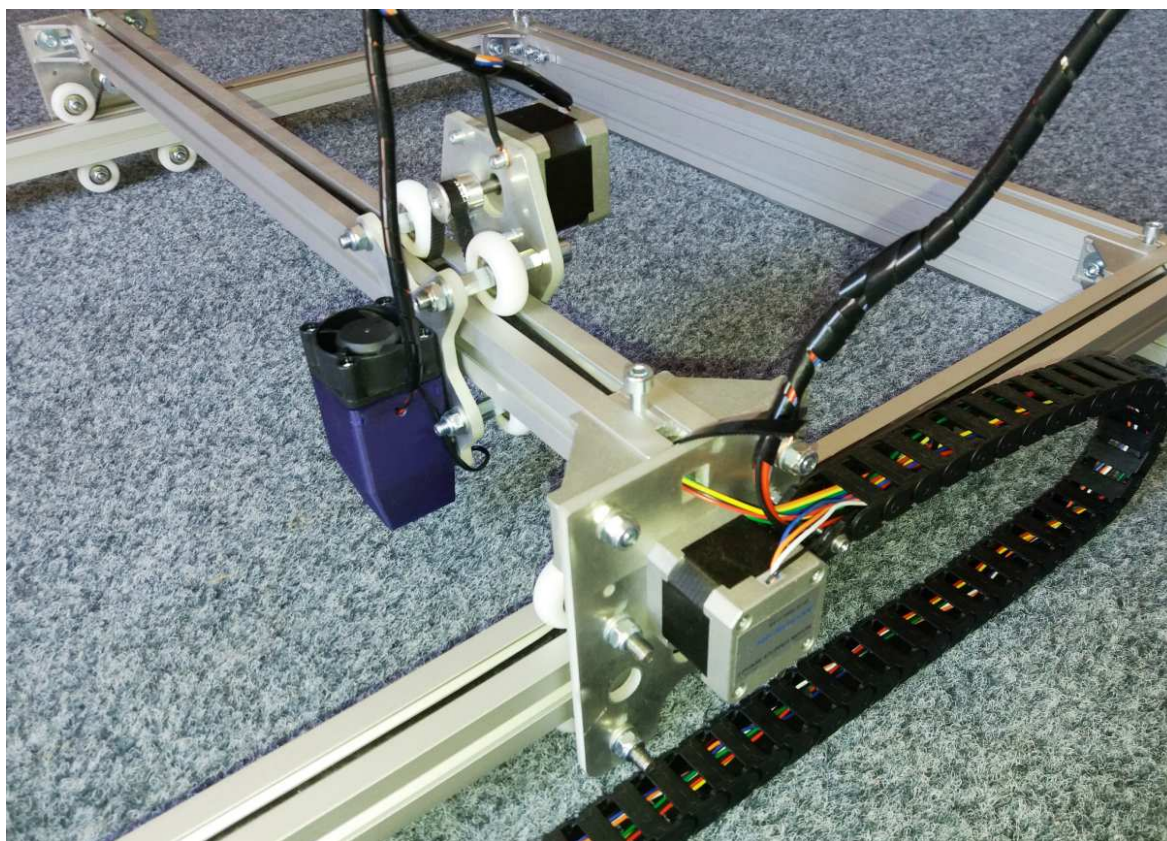
Obr. 8.2 – První zkoušky gravírování

Následující obrázek zobrazuje umístění diody v laserovém modulu. Z chladiče vyčnívá pouze objektiv, kterým se ručně zaostřuje paprsek na gravírovaný obrobek.



Obr. 8.3 – Spodní pohled na laserový modul

Na obrázku 8.4 je zachycen pohled na oba posuvy a uložení kabelů do článkového energetického řetězu.



Obr. 8.4 – Detail posuvů a uložení kabelů

9. Závěr

V diplomové práci jsem navrhl hobby laserový gravírovací stroj pro domácí použití. Zařízení je navrženo s ohledem na jednoduchost a minimalizaci nákladů spojených s výrobou i provozem stroje.

Začátek práce se zabývá vysvětlením pojmu gravírování a přehledům jeho různých technologií výroby. Následuje kapitola popisující podrobněji laserového gravírování. Zde je nastíněna historie a princip fungování. Dále kapitola pokračuje rozdělením jednotlivých typů laserů s jejich výhodami a použitím v praxi.

Navrhnutý rám zařízení tvoří hliníkové profily sešroubované pomocí zpevňujících úhelníků. Pohonnou částí jsou tři krokové motory s ozubenými řemeny. Tato pohonná část je kontrolována, zda-li vyhovuje požadavkům pohonu. Napínání řemenu jsem navrhl s ohledem na rychlost a jednoduchost. Pojezd zajišťují kolečka odvalující se v profilové drážce rámu z hliníkových profilů. U daných profilů jsou vypočteny jejich průhyby. Kolečka jsou uložena na mnou navržených osách, které jsem početně zkontroloval a následně vyrobil na soustruhu. V kolečkách jsou kuličková ložiska. Jejich trvanlivost při vypočteném zatížení odpovídá asi 197 let při nepřetržitém provozu, nedojde-li k jinému jejich poškození. Důležitou částí je výpočet, nastavení a teplotní kontrola ovladačů motorů. Teplotní kontrolu jsem provedl s termokamerou Fluke TIS 40.

K pojezdu osy X je připevněn laserový modul. V něm je uložena 6W laserová dioda NUBM44 vhodná ke gravírování dřeva a jiných organických materiálů. Konstrukci modulu jsem navrhl tak, aby chlazení diody bylo co nejefektivnější. Housing modulu je vytisknut 3D tiskárnou z plastu PETG. V jeho přírubě jsem navrhl zatisknutí matic M3 pro připojení přídatného ventilátoru. Diodu jsem experimentálně kontroloval zapisováním hodnot její teploty v určitých časových úsecích při nastavení maximálního výkonu laseru. Graf ze zapsaných hodnot je v kap.6. Maximální teplota nepřesáhla dovolenou hranici 40°C, proto navržený modul vyhovuje. Veškeré kabely stroje jsou pohyblivě uloženy ve svazovací spirále nebo článkovaném energetickém řetězu.

Další část práce se zabývá potřebným softwarem a programy pro vlastní nastavení a obsluhu gravírovacího stroje. Všechny uvedené programy jsou volně přístupné z webu. Poslední kapitolou je zobrazení vyrobeného a funkčního gravírovacího zařízení.

Diplomová práce splnila všechny podmínky zadání.

10. Literatura

- [1] HAVLÍK, Jiří. *Výpočty a konstrukce strojních dílů - cvičení*. [cit. 2018-03-22]. Skripta VŠB TU Ostrava FS – kat. Části a mechanismy strojů.
- [2] KŘÍŽ, Rudolf a Josef TRČKA. *Tabulky materiálů pro strojírenství*. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-85780-92-5.
- [3] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4. dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [4] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard Gordon BUDYNAS, HARTL, Martin a Miloš VLK (eds.). *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] ALLIEXPRESS: *Mini DIY laser engraving machine* [online]. [cit. 2018-01-14]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/store/product/1PC-DIY-Mini-Laser-Engraver-Laser-engraving-Machine-For-Small-Artware-Carved-Chapter-Rubber-Stamp/2805025_32775981258.html
- [6] CEZ: *Jak funguje laser* [online]. [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [7] CNC1: *3D CNC fréza* [online]. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: http://www.cnc1.eu/sk/Kompas_H_1000_HF01.htm
- [8] CNC.INSHOP: *Laserová 100W trubice CO2* [online]. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/co2-laserove-trubice2/co2-laser-tube-rezi-z4-100w>
- [9] DTRLPF: *Diode modules* [online]. [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/dtrlpf/home/diode-modules>
- [10] EFATIGUE: *Stress concentration* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.efatigue.com/constantamplitude/stressconcentration/#a>
- [11] EHLINIK: *Stavebnicový systém kombi* [online]. [cit. 2018-01-19]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/stavebnicovy-system-kombi/kat-I200000101.html>
- [12] FASTMILL: *Energetické řetězy* [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://fastmill.cz/35-energeticke-retezy>
- [13] CHINA-CNCROUTER: *CO2 laser cutting engraving machine* [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://www.china-cncrouter.com/products/SL-1060-100W-DSP-Control-CO2-USB-Laser-Cutter-Laser-Cutting-Engraving-Machine-1000-x-600mm-from-Chin.html>

- [14] JTECHPHOTONICS: *Adjustable laser diode driver kit* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://jtechphotonics.com/?product=2-0-amp-adjustable-laser-diode-driver-kit-8v-compliance>
- [15] LASCAM: *Rozdělení laserů Nd-YAG* [online]. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/sk/rozdelenie-laserov/>
- [16] LASCAM: *Vláknové laserové gravírování* [online]. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/sk/laserove-gravirovanie/>
- [17] LINTECH: *Pulzní vláknový laser* [online]. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/pulzni-vlaknovy-laser>
- [18] MEGA-BLOG: *Jak řezat laserem do dřeva a výběr konstrukce laseru* [online]. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/jak-rezat-laserem-do-dreva-a-jaky-laser-si-na-to-poridit/>
- [19] MEGA-BLOG: *Spektrum lomu světla* [online]. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/files/2012/03/spectrum-700x235.jpg>
- [20] MICROCON: *High torque stepper motor* [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.microcon.cz/produkty>
- [21] POLOLU: *Datasheet driver A4988* [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/file/0J450/A4988.pdf>
- [22] ROCKLER: *Laser cutter engravers* [online]. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <http://www.rockler.com/power-tools/laser-cutters-engravers>
- [23] SHAPEOKO: *GRBL open source* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.shapeoko.com/wiki/index.php/Grbl#Overview>
- [24] SKF: *Jednořadá kuličková ložiska* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=W%20636-2RZ>
- [25] THORLABS: *Opnext laser diode* [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=HL40023MG>
- [26] WCSIMN: *WaterJet projects* [online]. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <http://wcsimn.com/projects>

11. Přílohy

Příloha A	Náklady na stavbu stroje
Sestavný výkres hobby laserového gravírovacího stroje	VIT0082
Sestavný výkres pohonu X	VIT0082-01S
Sestavný výkres pohonu Y	VIT0082-02S
Sestavný výkres laserového modulu	VIT0082-03S
Výrobní výkres osy	VIT0082-04V
Výrobní výkres matice napínáku řemenu	VIT0082-05V

Kompletní diplomová práce je uložena v elektronické podobě na CD mediu.